



Maria Francisca Vieira de Castro Sousa Chaves

Licenciatura em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

**MELHORIA ENERGÉTICA DO SECTOR DE SODA LEVE
CONFORME A NOVA METODOLOGIA
MANUFACTURING EXCELLENCE
*SOLVAY PORTUGAL***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Química e Bioquímica

Orientador: Engenheiro José Fernando Conceição Ferreira
Co-orientador: Prof. Doutora Maria Ascensão C.F. Miranda Reis

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ana Maria Martelo Ramos
Arguente: Prof. Doutor José Paulo Barbosa Mota



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2012

Maria Francisca Vieira de Castro Sousa Chaves
Licenciatura em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

MELHORIA ENERGÉTICA DO SECTOR DE SODA LEVE
CONFORME A NOVA METODOLOGIA
MANUFACTURING EXCELLENCE
SOLVAY PORTUGAL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Química e Bioquímica

Orientador: Engenheiro José Fernando Conceição Ferreira
Co-orientador: Prof. Doutora Maria Ascensão C.F. Miranda Reis

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ana Maria Martelo Ramos
Arguente: Prof. Doutor José Paulo Barbosa Mota

Setembro de 2012

Copyright Maria Francisca Vieira de Castro Sousa Chaves, FCT-UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à *Solvay Portugal* e a todos os envolvidos no meu processo de integração no que foi a minha primeira experiência numa empresa, pela forma extraordinária como me acolheram e se prontificaram a resolver qualquer tipo de questões ligadas à elaboração de uma dissertação de mestrado em ambiente industrial.

Gostaria ainda de agradecer ao antigo Chefe do Departamento de Produtos Sódicos, o Engenheiro Jorg Dietzel, por me ter concedido a oportunidade de integrar o projeto *Solwatt* na Póvoa e de ter permitido a realização da minha dissertação de mestrado a partir deste projeto, e ainda ao atual Chefe de Departamento, o Engenheiro Stephane Lepercq, pela sua disponibilidade para tirar qualquer tipo de dúvidas e pela forma como me orientou neste percurso em tudo diferente do que eu estava habituada.

À minha co-orientadora a Professora Doutora Maria Ascensão Miranda Reis, pelo apoio e por ter sempre acreditado em mim.

Ao meu orientador, o Engenheiro José Conceição Ferreira, um agradecimento especial por todo o tempo que disponibilizou e por todos os conhecimentos que me transmitiu, já que sem a sua colaboração preciosa a realização deste projeto não teria sido possível. Um outro agradecimento especial ao Engenheiro Laurent Bessenay pelos valiosos conhecimentos e que, sem exceção, se prontificou para me ajudar no que pôde.

Gostaria também de agradecer a todos os colaboradores da *Solvay Portugal* do Departamento de Produtos Sódicos, pelo tempo que todos eles despenderam para, TODOS os dias, me ensinarem algo novo, em particular aos condutores da sala de controlo da soda leve e aos condutores da sala de controlo.

Por fim agradeço a todos os meus amigos e família que tiveram um papel tão importante nesta minha jornada.

A todos vós muitíssimo obrigada!

A dissertação de mestrado aqui apresentada é uma versão amputada da versão original que, no dia 25 de Setembro de 2012, foi entregue e discutida com os quatro membros do júri. Por motivos de confidencialidade e para proteger a propriedade intelectual da Solvay S.A. os valores, ou os intervalos de valores, apresentados nesta versão podem não corresponder à realidade. Adicionalmente, pelas razões já apresentadas, no decorrer deste documento as unidades de medida foram substituídas pela representação “xx”.

Resumo

Com base na metodologia desenvolvida pelo projeto *Solwatt*, realizou-se uma melhoria energética do secador de soda leve na unidade de produção de carbonato de sódio do complexo industrial da *Solvay* em Portugal, de forma a determinar as parcelas que representam o maior impacto no consumo energético total deste equipamento, em 2011. Concluído o balanço energético, verificou-se que o sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio e, ainda, o aquecimento da humidade no bicarbonato de sódio são duas das parcelas que consomem mais energia. Deste modo, definiu-se um plano de melhoria para cada uma das parcelas.

No caso da primeira parcela, implementou-se, no secador 1, um indicador de atividade (KAI) para a temperatura de saída da soda leve, cerca de 100 - 300 °C com uma margem de trabalho superior e inferior de 4 °C. Como tal, depois da implementação do KAI, observou-se uma diminuição do valor médio da temperatura de saída da soda leve, comparativamente com os valores de 2011, o que corresponde a um ganho de cerca de 200 - 6000 xx de vapor por ano.

Para a segunda parcela, uma vez que está diretamente relacionada com o funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, planeou-se um estudo completo para compreender o seu modo de funcionamento aquando da variação da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, já que o sector da carbonatação na Póvoa opera de uma maneira única. Desta forma, compreendeu-se que a variação da qualidade da suspensão tem um impacto muito significativo na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio. Por outro lado, os ensaios realizados no filtro parecem permitir concluir que a lavagem do bolo pode realizar-se com um débito de água de lavagem menor, 2 - 10 xx, do que a média dos débitos utilizados em 2011, 2 - 10 xx, o que se pensa resultar num ganho anual de aproximadamente 200 - 6000 xx de vapor e 200 - 6000 xx de leite de cal no sector da destilação, e ainda 200 - 6000 xx de água desmineralizada.

Por conseguinte, deste projeto de otimização energética do sector de soda leve, resulta um ganho total de 10 - 100 xx euros por ano, sem ser necessário qualquer investimento.

Termos chave: Balanço de energia, Secador de soda leve, Melhoria energética, Temperatura da soda leve à saída do secador de soda leve, Filtro rotativo sob vácuo.

Abstract

According to the Solwatt project methodology, an energetic optimization of the light soda dryers at the sodium carbonate production unit in Solvay Portugal plant was performed, in order to calculate the more energetic steps in 2011. Completed the dryers' energy balance it was clear that overheating of calcinations reaction's products and sodium bicarbonate moisture and also heating of sodium bicarbonate moisture are the two steps which have higher energy consumption. Thus it was outlined an optimization plan for each step.

Aiming to optimize the first step, it was implemented a key activity indicator (KAI) for the light soda temperature at dryer's 1 outlet, about 100 - 300 °C with a 4 °C upper and lower margin. Subsequent to KAI's implementation, results show a reduction of the average temperature at the dryer's 1 outlet, compared to the 2011 average, leading to a 200 - 6000 xx of steam saving per year.

At last, since the second step is directly related to the rotary vacuum filter's operation, it was planned a complete study about the effect of changing the sodium bicarbonate slurry quality in the filter's operation, as carbonation sector at Povoá's plant runs in a unique way. This variation has a significant result at sodium bicarbonate's moisture and chlorides content, obtained at the filtration sector. On the other hand, the assays conducted on the filter seem to demonstrate that the cake can be washed with a lower washing water flow, 2 - 10 xx, compared to the 2011 average, 2 - 10 xx, which appear to lead to an annual saving at the distillation of 200 - 6000 xx of steam and 200 - 6000 xx of lime milk, and also 200 - 6000 xx of demineralized water.

As a result, this energetic optimization project of the light soda sector allows a total saving of 10 - 100 xx euros per year, with no need of investment.

Keywords: Energy balance, Light soda dryer, Energetic optimization, Light soda temperature at the dryer's outlet, Rotary vacuum filter.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Motivação.....	1
1.2.	Objetivos	4
2.	Revisão bibliográfica.....	5
2.1.	Processo de fabrico do carbonato de sódio.....	5
2.1.1.	Sector da depuração da salmoura e absorção	8
2.1.2.	Sector do forno de cal e do dissolvedor.....	8
2.1.3.	Sector da carbonação.....	9
2.1.4.	Sector da soda leve	10
2.1.5.	Sector da soda densa.....	11
2.1.6.	Sector da destilação	12
2.2.	Descrição do sector da soda leve na Póvoa	13
2.2.1.	Filtro rotativo sob vácuo na Póvoa.....	13
a.	Constituição do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa.....	14
i.	Estrutura móvel	14
ii.	Estrutura fixa	14
iii.	Componentes complementares	16
b.	Funcionamento do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa	16
i.	Filtração.....	18
ii.	Secagem intermédia	18
iii.	Lavagem	19
iv.	Secagem.....	21
v.	Recolha de bicarbonato de sódio	21
vi.	Sopragem	22
c.	Variáveis de controlo do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa.....	23
2.2.2.	Secador de soda leve na Póvoa.....	25
2.3.	Balanços Energéticos	27

3.	Metodologias	29
3.1.	Balanço energético	29
3.1.1.	Consumo energético total dos secadores	30
3.1.2.	Consumo energético para o melhor desempenho dos secadores	31
3.1.3.	Consumo energético teórico	33
a.	Perdas energéticas por perda de soda leve	33
b.	Perda energética por perda de calor através da superfície externa do secador	34
c.	Perda energética por aquecimento do bicarbonato de sódio seco.....	34
d.	Perda energética por aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio	35
e.	Perda energética por sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio	35
f.	Perda energética por aquecimento do ar.....	36
g.	Perda energética por ocorrer a reação de libertação do amoníaco.....	37
3.2.	Melhoria energética.....	38
3.2.1.	Sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio... ..	38
3.2.2.	Aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio	40
a.	Relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral.....	42
b.	Impacto do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio	45
c.	Impacto do vácuo de fixação, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio.....	45
4.	Resultados e discussão	49
4.1.	Balanço energético	49
4.2.	Melhoria energética.....	51
4.2.1.	Sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio... ..	51
4.2.2.	Aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio	52
a.	Relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral.....	52

b.	Impacto do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio	55
c.	Impacto do vácuo de fixação, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio.....	58
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	59
6.	Bibliografia.....	61

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução do custo de importação internacional do petróleo (brent), do carvão-vapor e do gás natural no período de 1990 a 2008, em euros por tonelada equivalentes de petróleo (3).	1
Figura 2.1 - Esquema do processo produtivo do carbonato de sódio leve e denso na Solvay em Portugal.	7
Figura 2.2 – Filtro rotativo no sector de soda leve da Póvoa de Santa Iria.	13
Figura 2.3 – Fotografia da tela filtrante sobre o tambor cilíndrico do filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da <i>Solvay</i> em Portugal.	14
Figura 2.4 – Esquema representativo do disco distribuidor, a preto, do filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da <i>Povoa</i> (13).	15
Figura 2.5 – Fotografia do separador do líquido filtro, pela tubagem inferior, e do gás filtro, pela tubagem superior, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa.	15
Figura 2.6 – Fotografias de alguns dos componentes complementares do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa: a) Em primeiro plano os dispersores e os respetivos suportes, no topo da imagem, o rolo compressor superior a preto; b) Rolo compressor inferior.	16
Figura 2.7 - Esquema representativo das zonas delimitadas pelo disco distribuidor, a preto, e dos respetivos tipos de vácuo, de fixação ou geral, ou ar comprimido, para o filtro rotativo sob vácuo na Póvoa. Em segundo plano, a cinzento tem-se a estrutura interna do tambor, onde as cavidades a branco representam os alvéolos (14).	17
Figura 2.8 – Esquema representativo das várias zonas de operação pelas quais o bolo (camada amarela) passa durante uma revolução completa do tambor do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa. A camada amarela representa o bolo de bicarbonato de sódio, os dois círculos pretos na periferia do tambor (estrutura cinzenta) representam os rolos compressores, os círculos azuis representam as rampas de lavagem em funcionamento e os encarnados as fora de serviço (13).	17
Figura 2.9 – Esquema representativo do disco distribuidor e respetivas zonas de operação, utilizado no filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da <i>Solvay</i> em Portugal. A cinzento tem-se a estrutura interna do tambor, onde as cavidades a branco representam os alvéolos. A preto tem-se a estrutura do disco distribuidor e pelas zonas translúcidas ocorre a passagem de líquido e gás filtro (14).	18

Figura 2.10 – Esquemas representativos da zona de operação de filtração, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	18
Figura 2.11 - Esquemas representativos da zona de operação de secagem intermédia, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	19
Figura 2.12 - Esquemas representativos da zona de operação de lavagem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	19
Figura 2.13 – Configuração das rampas de lavagem no filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da <i>Solvay</i> em Portugal.	20
Figura 2.14 - Esquemas representativos da zona de operação de secagem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	21
Figura 2.15 - Esquemas representativos da zona de operação de recolha de bicarbonato de sódio, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	22
Figura 2.16 - Esquemas representativos da zona de operação de sopragem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).	22
Figura 2.17 – Secador de soda leve no complexo industrial da <i>Solvay</i> em Portugal (entrada do bicarbonato de sódio na extremidade do secador mais distante e saída do carbonato de sódio leve, alimentação do vapor de água e saída do vapor de água condensado na extremidade do secador mais próxima).	25
Figura 2.18 – Serpentinhas dentro do secador de soda leve, na Póvoa, junto à parede interna.	26
Figura 2.19 – Sistema com uma corrente de entrada (E) e uma corrente de saída (S), onde T e P representam a temperatura e pressão da corrente, respetivamente, m_i representa a quantidade do componente i em cada uma das correntes e Q corresponde à quantidade de calor transferido (21).	27
Figura 4.1 – Representação do consumo energético específico por tonelada consumida de bicarbonato de sódio e da curva de melhor desempenho.	49
Figura 4.2 – Representação gráfica dos consumos energéticos dos três patamares, a azul, e das parcelas, a amarelo e encarnado, que representam as perdas energéticas dos dois secadores em 2011.	50
Figura 4.3 - Evolução da temperatura de saída da soda leve do secador 1, em 2012, desde 26 de Abril a 31 de Julho, sendo a reta encarnada a média dos valores no período que decorre entre 26 de Abril e	

21 de Maio de 2012 e a reta verde a média dos valores no período de 22 de Maio a 31 de Julho de 2012.....	51
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Listagem das variáveis de controlo no processo de filtração com respetiva classificação e unidades (com base em (17) e (18)).	23
Tabela 3.1 - Listagem dos três patamares energéticos dos secadores e das parcelas que representam as perdas energéticas.....	30
Tabela 3.2 – Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os dois ensaios, A.1 e A.2.	43
Tabela 3.3 – Listagem das condições estabelecidas para as variáveis manipuladas dos ensaios A.3 e A.4.	44
Tabela 3.4 - Listagem das variáveis manipuladas e das respetivas condições estabelecidas para os ensaios, A.5 e A.6.....	44
Tabela 3.5 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os dois ensaios, B.1 e B.2.	45
Tabela 3.6 - Listagem das variáveis manipuladas e das respetivas condições estabelecidas para os ensaios, C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5.	46
Tabela 3.7 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os quatro ensaios, D.1, D.2, D.3 e D.4.....	47
Tabela 3.8 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os ensaios E.1, E.2, E.3 e E.4.	48
Tabela 4.1 – Lista com algumas das variáveis registadas nos dois ensaios, A.1 e A.2, onde se variou a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.	52
Tabela 4.2 - Listagem de algumas das variáveis registadas nos ensaios A.3 e A.4, não tendo sido registados os valores da densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo todos os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.	53
Tabela 4.3 - Lista com algumas das variáveis registadas nos ensaios A.5 e A.6, não tendo havido um registo dos valores da densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo todos os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.	54

Tabela 4.4 – Apresentação da média dos valores do vácuo geral, registados antes e depois da recolha das amostras, e da média dos valores do teor de cloretos e da humidade do bicarbonato de sódio das nove amostras recolhidas em cada ensaio.	56
---	----

Abreviatura

bar abs. – Unidade de pressão em bar absolutos

BiS – Bicarbonato de sódio

BiSh – Bicarbonato de sódio húmido

CaS – Carbonato de sódio

KAI – indicador de atividade

SBiS – Suspensão de bicarbonato de sódio

SL – Soda leve

SSL – Secador de soda leve

ton - toneladas

vap – vapor

Nomenclatura

A_{SSL} - Área da superfície externa dos secadores cilíndricos (xx)

$Cp_i(T)$ - Calor específico em função da temperatura do componente i (xx)

$Cesp_{secador_i}$ - Soma do consumo energético específico dos dois secadores (xx)

$c_{secador1}$ - Comprimento do secador i (xx)

$d_{secador\ i}$ - Diâmetro do secador i (xx)

$E_{secador}$ - Consumo energético total dos secadores (xx)

E_{marcha} - Perda energética por variação de marcha (xx)

$E_{desempenho}$ - Perda energética por variação de desempenho (xx)

E_{md} - Consumo energético para o melhor desempenho dos secadores (xx)

E_a - Perda energética por perda de soda leve (xx)

E_b - Perda energética por perda de calor através da superfície externa dos secadores (xx)

E_c - Perda energética por aquecimento do bicarbonato de sódio seco (xx)

E_d - Perda energética por aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio (xx)

E_e - Perda energética por sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio (xx)

E_f - Perda energética por aquecimento do ar (xx)

E_g - Perda energética por ocorrer a reação de libertação do amoníaco (xx)

$E_{teórico}$ - Consumo energético teórico (xx)

$E_{vapor\ cond}$ - Energia do vapor condensado que sai dos dois secadores (xx)

E_{vapor} - Energia do vapor alimentado aos dois secadores (xx)

$E_{vapor\ i}$ - Energia do vapor alimentado aos dois secadores por hora (xx)

$E_{e\ i}$ - Perda energética por sobreaquecimento dos componentes i, podendo i ser: o dióxido de carbono, a água, a soda leve e a humidade do bicarbonato de sódio (xx)

E_{SL} - Energia consumida para aumentar um grau na temperatura de saída da soda leve por tonelada de soda leve (xx)

$Ganho_{KAI}$ - Ganho associado à aplicação do intervalo para o KAI (xx)

$H_{i_{vapor(P,T)}}$ - Entalpia do vapor alimentado ao secador i à pressão e temperatura do mesmo (xx)

$H_{i_{vaporcond(P,T_{sat})}}$ - Entalpia do vapor condensado que sai do secador i à pressão do vapor alimentado e à temperatura de saturação para esta pressão (xx)

h_{BiSh} - Humidade presente no bicarbonato de sódio (xx)

$H_{H_2O\ i}$ - Entalpia da água à temperatura i e à pressão atmosférica (xx)

H - Humidade do bicarbonato de sódio (xx)

k_T - Condutividade térmica da parede dos secadores (xx)

$l_{secador\ i}$ - Espessura da parede, com isolamento, do secador i (xx)

m_i^E e m_i^S - Quantidade do componente i na corrente de entrada e de saída, respetivamente (xx)

$m_{i_{vapor2011}}$ - Quantidade de vapor consumida em 2011 no secador i (xx)

$m_{BiSh\ i}$ - Quantidade de bicarbonato de sódio húmido alimentado ao secador por hora (xx)

MM_i - Massa molar do componente i (xx)

m_{ar} - Quantidade de ar que entra nos secadores por tonelada de soda leve (xx)

m_{NH_3} - Quantidade de amoníaco presente no bicarbonato de sódio húmido por tonelada de soda leve em 2011 (xx)

m_{BiSh} - Quantidade de bicarbonato de sódio húmido (xx)

m_{CaS} - Quantidade final da amostra depois das duas horas na mufla (xx)

$m_{BiSseco}$ - Quantidade de bicarbonato de sódio seco (xx)

meg_i - Miliequivalente grama do composto i (xx)

N_i - Normalidade do composto i (xx)

P_E e P_S - Pressão da corrente de entrada e de saída, respetivamente (xx)

P_{ivapor} - Média dos valores de pressão do vapor consumido em 2011 no secador i (xx)

$prod_{SLperdida}$ - Quantidade de soda leve perdida por ano (xx)

$prod_{SL2011}$ - Quantidade de soda leve produzida em 2011 (xx)

Q - Quantidade de calor transferida (xx)

T_E e T_S - Temperatura da corrente de entrada e de saída, respetivamente (°C)

T_{ivapor} - Média dos valores de temperatura do vapor consumido em 2011 no secador i (°C)

T_{int} - Temperatura no interior dos secadores em 2011 (°C)

T_{ext} - Temperatura ambiente em 2011 (°C)

T_{BiSh} - Temperatura de entrada nos secadores do bicarbonato de sódio húmido em 2011 (°C)

$T_{reação}$ - Temperatura da reação de calcinação (°C)

T_{int-md} - Temperatura de saída da soda leve para o melhor desempenho dos secadores em 2011 (°C)

T_{KAI} - Média dos valores da temperatura de saída da soda leve registados após a implementação do intervalo para o KAI no secador 1 (°C)

$T_{secador\ 1}$ - Média dos valores da temperatura de saída da soda leve do secador 1 em 2011 (°C)

v_{ar} - Volume de ar que entra nos secadores por tonelada de soda leve (xx)

V_i - Volume do composto i (xx)

$\Delta H_{f,i}^0$ - Entalpia padrão de formação do componente i (xx)

ΔH_r° - Entalpia padrão de reação (xx)

ΔH_{trs}° - Entalpia padrão de transição (xx)

ΔH_r - Entalpia da reação de libertação de amoníaco (xx)

ρ_{ar} - Densidade do ar (xx)

η - Rendimento do filtro rotativo sob vácuo (xx)

$NaCl_{BiSh}$ - Teor de cloretos no bicarbonato de sódio húmido (xx)

1. Introdução

1.1. Motivação

As questões ligadas à eficiência energética ocupam, cada vez mais, uma posição prioritária nas agendas dos líderes de todo o mundo, verificando-se a implementação de políticas neste âmbito na maioria dos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) e também em alguns não pertencentes (1).

O aumento dos custos de importação dos combustíveis fósseis, Figura 1.1, e a crescente sensibilização para as questões ambientais relacionadas com o consumo dos mesmos, fazem com que a aplicação de medidas de poupança de energia possa ter um impacto positivo na competitividade económica dos países. Torna-se, por isso, muito comum a criação de metas para diminuir os consumos energéticos por parte de muitos destes países (1), exemplo disso é a União Europeia (UE) que estabeleceu como objetivo diminuir em 20% os consumos energéticos até 2020, comparativamente com o valor da projeção da *Commission in its Green Paper on Energy Efficiency* para esse ano e, também se propõe a diminuir em 20% a emissão de gases com efeito de estufa, comparativamente com o valor registado no ano de 1990 (2).

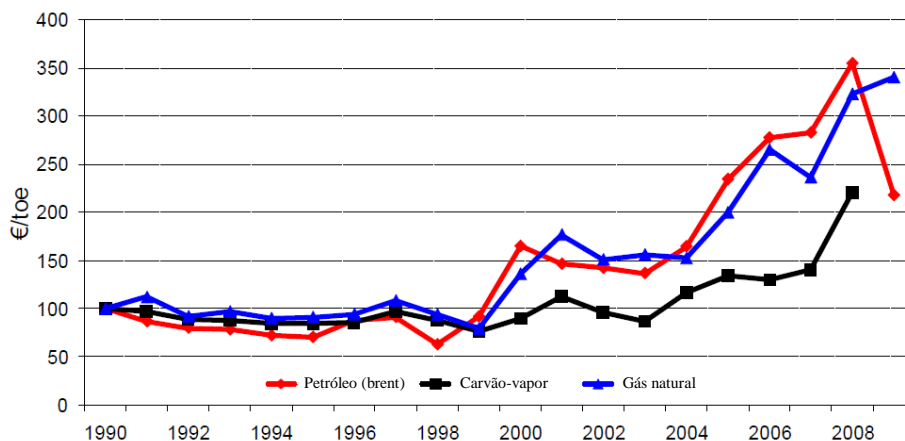


Figura 1.1 - Evolução do custo de importação internacional do petróleo (brent), do carvão-vapor e do gás natural no período de 1990 a 2008, em euros por tonelada equivalentes de petróleo (3).

De acordo com o que tem sido implementado pelo mundo, surgem algumas empresas que pretendem igualmente estabelecer este tipo de metas. Desta forma, e no âmbito desta tese de mestrado, surge o grupo *Solvay* fundado em 1863 pelos irmãos Ernest e Alfred Solvay e que, atualmente tem

representação em 40 países onde trabalham mais de 29 mil colaboradores, perfazendo em 2011 um volume de vendas de cerca de 12,7 biliões de euros¹ (4).

A evolução dos custos de aquisição de combustíveis fósseis tem igualmente um impacto importante no consumidor final, e como tal, também na indústria. Por conseguinte, a *Solvay* não é exceção, registando custos energéticos de cerca de 1 - 5 xx de euros por ano, o que corresponde a uma percentagem significativa das vendas líquidas. Aliado a esta situação, e sendo esta uma empresa que se compromete com uma estratégia de desenvolvimento sustentável, em 2011, estabelece como objetivo a diminuição em 20%, até 2020, dos consumos energéticos, das emissões dos gases de efeito de estufa e das emissões para a atmosfera e para a água (5).

Assim, em Janeiro de 2012 foi criada a *Solvay Energy Services*, o primeiro *Global Business Unit* (GBU) resultante da integração em 2011 da *Rhodia* na *Solvay*, cujo papel é o de diminuir os custos energéticos e as emissões de dióxido de carbono do grupo e, no futuro, de terceiros. Foi portanto criado o projeto de eficiência energética *Solwatt* que percorre as fábricas do grupo, possibilitando o cumprimento das metas com base numa nova metodologia de trabalho, o *manufacturing excellence* (5).

Com uma presença muito marcante na indústria química, a *Solvay* apresenta-se como uma empresa direcionada para três grandes mercados: o químico e o dos plásticos e, adicionalmente, o mercado pertencente à *Rhodia*. Dentro do mercado químico inserem-se os químicos especiais e os químicos essenciais, no caso dos plásticos engloba os polímeros especiais e os vinílicos, por fim, o mercado abrangido pela *Rhodia* reúne os químicos direcionados para o consumidor, os materiais de poliamida, a *Energy Services*, entre outros. (4).

Em Fevereiro de 2012, a *Solvay* em Portugal acolheu a equipa do projeto *Solwatt* no complexo industrial da Póvoa de Santa Iria onde se fabricam produtos apenas para o mercado dos químicos, essencialmente produtos²:

- Sódicos – carbonato de sódio, bicarbonato de sódio, silicato de sódio e cloreto de sódio;
- Clorados – soda cáustica, ácido clorídrico, hipoclorito de sódio e clorato de sódio;
- Peroxidados – peróxido de hidrogénio.

¹ *Pro forma*

² <http://www.solvay.pt/PT/solvayemp Portugal/complexoindustrial/produtosaplicacoes/home/carbonatosodio.aspx>

O projeto de melhoria energética foi aplicado em toda a unidade fabril, excetuando os consumos energéticos relacionados com a iluminação e climatização de edifícios, por terem uma contribuição muito reduzida comparativamente com os consumos energéticos dos vários processos.

Uma avaliação dos consumos energéticos do complexo em Portugal mostra que representam, aproximadamente, 1 - 10 % dos consumos energéticos do grupo (6). Fixou-se então uma primeira meta de *manufacturing excellence*, que consiste em diminuir 10% dos consumos energéticos verificados em 2011, o que representa uma redução de cerca de 1 - 10 xx de euros na fatura energética anual do complexo industrial da Póvoa (6).

1.2. Objetivos

A elaboração desta dissertação de mestrado em ambiente industrial é direcionada para a melhoria energética de um dos sectores, o da soda leve, da unidade de produção de carbonato de sódio, a unidade com maior capacidade de produção do complexo industrial da *Solvay* em Portugal.

Como tal, para poder ser feita esta melhoria energética foi implementado o modelo energético do projeto *Solwatt* de modo a quantificar o consumo energético, registados em 2011, de cada uma das parcelas do funcionamento do sector. Depois de quantificados os consumos energéticos foram definidas as parcelas a melhorar, tendo sido seleccionadas aquelas cujo contributo energético é mais significativo e que apresentam um maior potencial de melhoria. Tendo em conta os critérios de escolha apresentados são, então, seleccionadas duas etapas, a que contabiliza a energia consumida para sobreaquecer os produtos da reação de calcinação e a humidade no bicarbonato de sódio e, ainda, a que traduz a energia consumida para aquecer a humidade contida no bicarbonato de sódio.

Após identificadas as etapas a melhorar, são delineados dois planos de melhoria completamente distintos para cada uma das etapas. Um primeiro, ligado à etapa que contabiliza a energia consumida para sobreaquecer os produtos da reação de calcinação e a humidade no bicarbonato de sódio, cujo objetivo é diminuir a temperatura de soda leve à saída do secador, relativamente à média dos valores registado em 2011. Para tal é implementado um indicador de atividade (KAI³) para esta temperatura, complementado pela metodologia *manufacturing excellence*, que procura modificar o comportamento e a forma de pensar dos colaboradores, a todos os níveis hierárquicos, no que diz respeito às questões energéticas, para que as metas estabelecidas sejam cumpridas.

Por fim, é elaborado um segundo plano de melhoria associado à etapa de aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio, que está diretamente relacionado com o funcionamento do filtro rotativo sob vácuo. Como tal, uma vez que o complexo industrial da Póvoa de Santa Iria é o único do grupo que opera no sector da carbonatação com reatores em *batch*, a melhoria desta etapa consistiu em estudar e tentar compreender, pela primeira vez, qual o impacto da variabilidade da qualidade da suspensão, uma vez que se operar com reatores em *batch*, na regulação do filtro rotativo sob vácuo e, consequentemente, na humidade e teor de cloretos do bicarbonato de sódio obtido nos filtros.

³ KAI - Key Activity Indicator

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve descrição do processo de produção do carbonato de sódio seguida de uma exposição, um pouco mais completa, do modo de funcionamento dos dois equipamentos que constituem o sector da soda leve no complexo industrial da Póvoa de Santa Iria. Por fim, é feito um pequeno enquadramento genérico sobre balanços energéticos.

2.1. Processo de fabrico do carbonato de sódio

O carbonato de sódio, ou soda, é uma matéria-prima fundamental para as indústrias vidreira e da detergência, contudo, dependendo da aplicação recorre-se a carbonatos de sódio com diferentes densidades. No caso da indústrias vidreira utiliza-se, preferencialmente, a soda densa, com uma densidade de cerca de $1,0 \text{ t/m}^3$, enquanto que na indústria da detergência se utiliza soda leve, com cerca de $0,5 \text{ t/m}^3$ ⁴.

Atualmente recorre-se a diferentes processos para obter carbonato de sódio, dependendo da disponibilidade geográfica das matérias-primas. Assim, é possível enumerar alguns desses processos utilizados em todo o mundo (7):

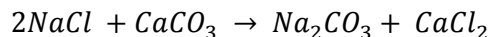
- Processos com recurso a minerais ricos em sódio, como por exemplo a trona ou o *nahcolita*, utilizados na América do Norte;
- Processo *Asahi*, que recorre a sal sólido em substituição da salmoura, utilizado em algumas regiões na Ásia onde não existem depósitos de salmoura disponíveis;
- Processo *Solvay* que utiliza o calcário, o combustível e a salmoura como matérias-primas, utilizado na Europa e na Ásia.

Sendo o complexo industrial da Póvoa de Santa Iria um representante *Solvay*, segue-se uma breve descrição do processo de produção de carbonato de sódio utilizado.

Conforme mencionado, existem três matérias-primas no processo *Solvay*, contudo podem ser contabilizados outros dois compostos que participam no processo de produção de soda: o amoníaco, que por ser recuperado e reciclado não é considerado uma matéria-prima, e o gás natural, consequência das necessidades energéticas deste processo, maioritariamente sob a forma de vapor, consumido na unidade de cogeração que está associada ao complexo industrial, abastecendo vapor aos processos neste complexo e eletricidade para a rede pública (8).

⁴<http://www.solvay.pt/PT/solvayemportugal/complexoindustrial/produtosaplicacoes/home/carbonatosodio.aspx>

De uma forma geral, o processo *Solvay* pode ser representado por uma única reação química teórica (Reação 2.1), no entanto, na prática esta reação não é realizável, uma vez que é necessária a participação de outros compostos químicos (o amoníaco e o combustível) para além da salmoura (NaCl) e do calcário (CaCO₃) considerados na Reação 2.1 (7).



Reação 2.1 - Equação química teórica do processo *Solvay* de produção de carbonato de sódio (7).

Na realidade o processo divide-se em vários passos a fim de se obterem os produtos finais pretendidos, a soda leve e densa. Assim este processo abrange nove operações sucessivas, representados na Figura 2.1, e agrupados em seis sectores ⁵:

- Sector da depuração da salmoura e absorção;
- Sector do forno de cal e do dissolvedor;
- Sector da carbonação;
- Sector da soda leve;
- Sector da soda densa;
- Sector da destilação.

⁵<http://www.solvay.pt/PT/solvayemportugal/complexoindustrial/produtosaplicacoes/home/carbonatosodio.aspx>

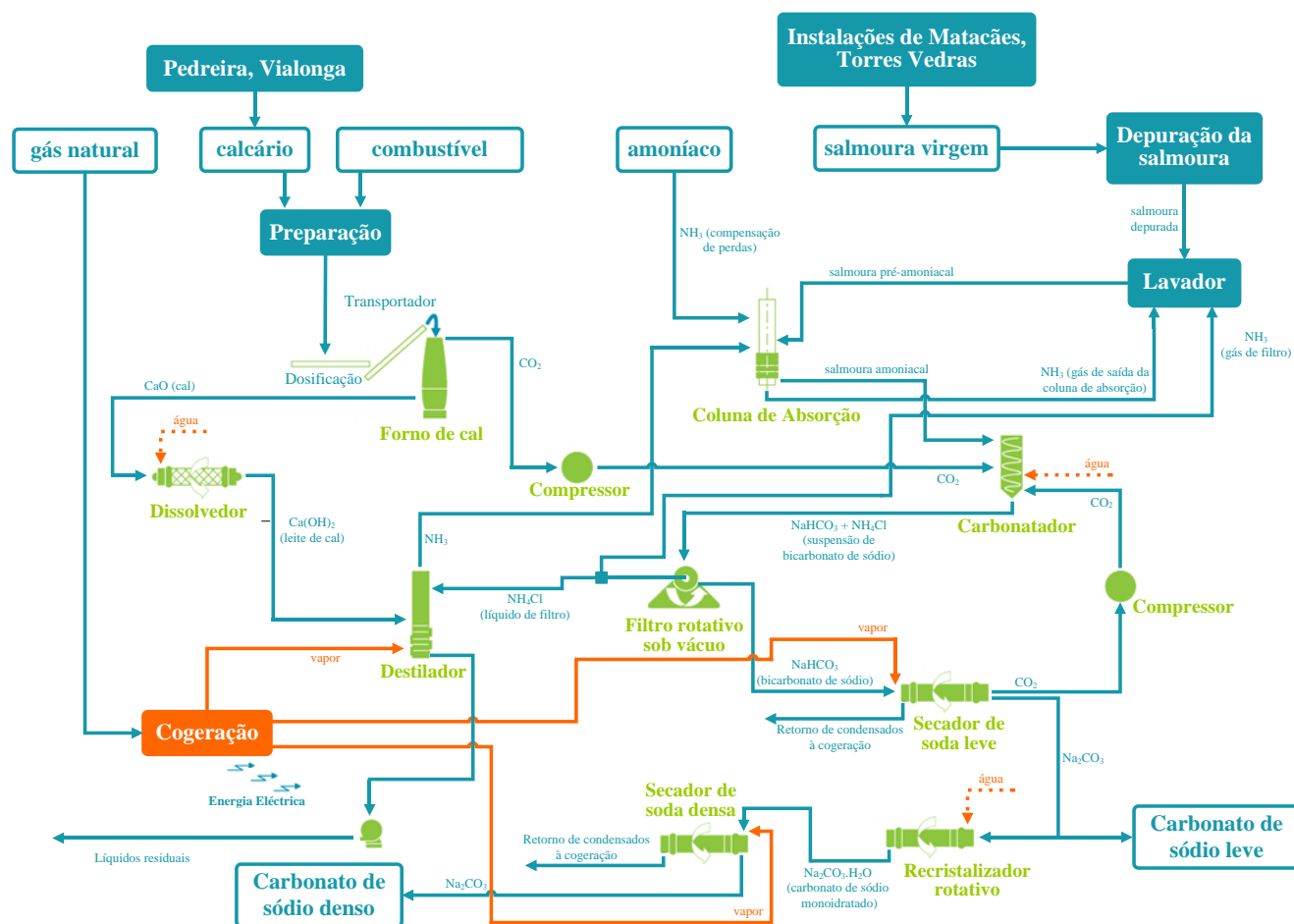


Figura 2.1 - Esquema do processo produtivo do carbonato de sódio leve e denso na Solvay em Portugal⁶.

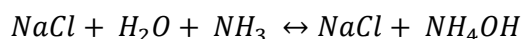
⁶ <http://www.solvay.pt/PT/solvayemportugal/complexoindustrial/produutosaplicacoes/home/carbonatosodio.aspx>

2.1.1. Sector da depuração da salmoura e absorção

A salmoura enviada para o processo, salmoura virgem, é extraída nas instalações de Matacães, Torres Vedras, e depois enviada para o complexo da Póvoa, através de uma tubagem subterrânea, consoante as necessidades dos processos que consomem esta matéria- prima (9).

Contudo, no processo da soda, a salmoura virgem não pode ser diretamente utilizada, uma vez que contém concentrações de cálcio e de magnésio superiores ao limite recomendável para o bom funcionamento da unidade de produção. Assim, procede-se à remoção destes compostos por depuração da salmoura virgem. Este processo consiste em transformar, mediante uma precipitação química, os sais solúveis de cálcio e de magnésio em sais menos solúveis que posteriormente são decantados e filtrados em filtros de areia (9).

Depois de depurada, a salmoura é enviada para o lavador onde sofre uma pré absorção de amoníaco. Nesta fase entra em contacto com o gás de saída da coluna de absorção e com o gás resultante da filtração. Segue-se a saturação da salmoura em amoníaco previamente recuperado no sector das destilações e algum amoníaco fresco para repor possíveis perdas (2.1.6). Esta última operação ocorre numa coluna de enchimento, sob vácuo, designada coluna de absorção, onde passa uma corrente gasosa rica em amoníaco através da corrente de salmoura pré-amoniacal, obtendo-se a salmoura saturada em amoníaco, salmoura amoniacal (Reação 2.2) (9) (7).



Reação 2.2 - Reação de absorção de amoníaco (NH₃) na salmoura (NaCl) de forma a obter uma salmoura amoniacal (7).

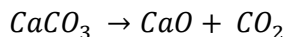
Por se tratar de uma reação exotérmica é necessário que seja feito um arrefecimento das correntes, de forma a se obter o produto, salmoura amoniacal, com a concentração em amoníaco desejada (9). Por fim, o gás que sai da coluna de absorção ainda contém algum amoníaco, pelo que, é enviado para os lavadores, como descrito a cima (7).

2.1.2. Sector do forno de cal e do dissolvedor

Neste sector, recorre-se a um forno vertical onde é introduzido o calcário, extraído na Pedreira em Vialonga, e combustível. Estas três matérias-primas, depois de preparadas numa instalação concebida para tal, onde é feita a crivagem do calcário, entre outros, são alimentadas já como uma mistura única (10).

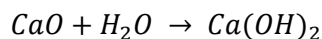
Da exploração do forno de cal, Reação 2.3, obtêm-se dois produtos cruciais para o processo: um gás com elevada concentração de dióxido de carbono, que irá participar na reação de carbonatação (2.1.3),

e a cal que será a matéria-prima no sector do dissolvedor. De forma a obter estes dois produtos com a qualidade necessária para o processo, é controlada a introdução de oxigénio, comburente, por ventilação de ar para o interior do forno, sendo a qualidade do gás considerada prioritária, em detrimento da qualidade da cal (8) (7).



Reação 2.3 – Reação de cozedura do calcário ($CaCO_3$), entre os 950 e os 1100°C, para obter cal (CaO) e dióxido de carbono (CO_2) (7).

Ainda neste sector, a cal obtida no forno é alimentada ao dissolvedor onde é hidratada a fim de se obter leite de cal, ou hidróxido de calcário (Reação 2.4). Este produto é posteriormente utilizado na destilação (2.1.6) para recuperar o amoníaco. O caudal de alimentação de água e a sua temperatura são reguladas tendo em conta a qualidade final do leite de cal (8).



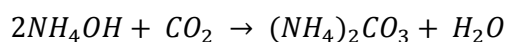
Reação 2.4 – Reação de produção de leite de cal ($Ca(OH)_2$) por hidratação de cal (CaO) (8).

No final desta operação, à saída do dissolvedor, o leite de cal é separado das pedras de calcário que não reagiram, os incozidos de calcário, que são reenviados para dentro do forno (7).

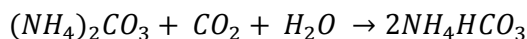
2.1.3. Sector da carbonação

As reações de carbonatação, para obter a suspensão de bicarbonato de sódio que depois é enviada para o sector de soda leve, são realizadas nas colunas *Solvay* que operam em contínuo. Tem-se como matérias-primas para estas reações a salmoura amoniacal e dois tipos de gases ricos em dióxido de carbono, o gás proveniente do forno de cal e o gás resultante da calcinação no secador de soda leve (7).

As duas primeiras reações (Reação 2.5 e a Reação 2.6) que ocorrem neste sector, em simultâneo, descrevem a absorção e reação do dióxido de carbono com a solução de salmoura amoniacal. Sendo exotérmicas, permite-se que o sistema evolua até se atinge a temperatura de início de cristalização, depois da qual o arrefecimento deve ser iniciado (8).

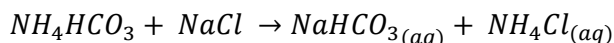


Reação 2.5 – Reação de absorção do dióxido de carbono para produzir um primeiro composto intermediário, o carbonato de amónio ($(NH_4)_2CO_3$) (7).

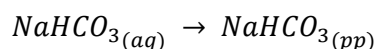


Reação 2.6 – Reação do carbonato de amónio com o dióxido de carbono para produzir o bicarbonato de amónio (NH_4HCO_3) (7).

Por fim dão-se as reações representadas pela Reação 2.7 e pela Reação 2.8. A primeira permite obter o bicarbonato de sódio, a partir do bicarbonato de amónio e a segunda representa a precipitação do produto desejado, bicarbonato de sódio, por arrefecimento (8).

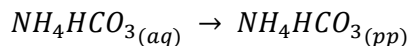


Reação 2.7 – Reação de produção do bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) a partir do bicarbonato de amónio (NH_4HCO_3) (8).



Reação 2.8 – Precipitação do bicarbonato de sódio, por arrefecimento (8).

Pode, no entanto, ocorrer uma reação não desejada caso a temperatura de arrefecimento seja demasiado baixa, Reação 2.9. Nestas circunstâncias, em vez de ocorrer a precipitação do bicarbonato de sódio, precipita o bicarbonato de amónio. Esta reação paralela consome um dos reagentes da Reação 2.7, NH_4HCO_3 , o que resulta na diminuição do rendimento das colunas de carbonatação (8).



Reação 2.9 – Precipitação do bicarbonato de amónio aquando de uma temperatura de arrefecimento demasiado baixa (8).

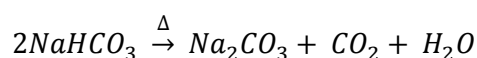
Ao contrário do que se passa nas unidades de produção de soda em todo o mundo, na Póvoa o sector de carbonatação recorre a reatores de carbonatação, os carbonatadores, em substituição das colunas *Solvay*. Estes reatores trabalham em *batch*, o que faz com que a variabilidade da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio (densidade da suspensão e tamanho do grão) seja tanto maior quanto o número de reatores em funcionamento (8).

2.1.4. Sector da soda leve

Neste sector ocorrem duas operações distintas, a filtração e a calcinação. A primeira abrange três etapas: a filtração que consiste na separação da fase sólida, o bicarbonato de sódio, da fase líquida, as águas mães (denominadas líquido filtro); a lavagem do bicarbonato de sódio e a secagem do mesmo (8).

No grupo existem duas tecnologias diferentes adotadas nos diferentes complexos para executar esta separação, no caso da unidade na Póvoa de Santa Iria utiliza-se o filtro rotativo sob vácuo (8).

Como tal, por se tratar de uma filtração sob vácuo, para além da fase sólida e líquida resulta também um gás, denominado gás filtro. Assim sendo, desta operação resultam três produtos que têm destinos diferentes, o gás filtro com vestígios de amoníaco, depois de separado do líquido filtro, é enviado para o lavador onde entra em contacto com a salmoura depurada, obtendo-se uma salmoura pré-amoniaca que depois é enviada para a coluna de absorção. Por outro lado, o líquido filtro é enviado para o sector da destilação onde é recuperado o amoníaco, e por fim, o bicarbonato de sódio que é enviado para o secador de soda leve onde sofre a calcinação (Reação 2.10) (8).



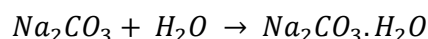
Reação 2.10 – Reação de calcinação, por efeito de temperatura, do bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) a soda leve (Na_2CO_3) (8).

A operação de calcinação no sector de soda leve ocorre nos secadores, onde é utilizado vapor como fonte de energia de modo a atingir a temperatura de reação, cerca de 160 - 230 °C. Desta forma, ocorre a decomposição, por efeito de temperatura, do bicarbonato de sódio a soda leve e produz-se um gás, denominado gás secador, rico em dióxido de carbono que é utilizado no sector da carbonatação (8).

Desta forma, obtém-se neste sector o primeiro produto final da unidade de produção da soda, a soda leve. Contudo, apenas parte deste produto é comercializado, uma vez que, o restante é enviado para o sector da soda densa como matéria-prima.

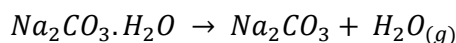
2.1.5. Sector da soda densa

Como já foi referido, neste sector a soda leve é a principal matéria-prima, onde é densificada por recristalização para se obter a soda densa. Para concluir esta recristalização são necessárias duas etapas com dois equipamentos distintos. A primeira etapa realiza-se no recristalizador rotativo, onde ocorre a humedificação da soda leve com água (Reação 2.11), a fim de se obter um produto intermédio, o carbonato de sódio monohidratado (8).



Reação 2.11 – Reação de hidratação da soda leve (Na_2CO_3) para obter o carbonato de sódio monohidratado ($Na_2CO_3 \cdot H_2O$) (7).

Na segunda etapa, o carbonato de sódio monohidratado é alimentado ao secador de soda densa onde, por efeito da temperatura, é removida a água adsorvida (Reação 2.12). Obtém-se assim a soda densa, o último produto final da unidade de produção da soda.



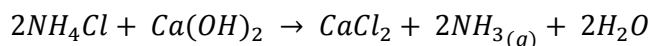
Reação 2.12 – Reação de desidratação do carbonato de sódio monoidratado para obter soda densa (7).

2.1.6. Sector da destilação

É neste sector, dos mais delicados da unidade de produção de carbonato de sódio, que se faz a recuperação do amoníaco que esteve envolvido no processo de produção do bicarbonato de sódio (2.1.3). Caso não existissem perdas de amoníaco não seria necessário adicionar amoníaco fresco no processo, como tal, a quantidade deste amoníaco que é adicionada depende inteiramente deste sector (8).

Este sector tem como matérias-primas o líquido filtro, da operação de filtração no sector da soda leve (2.1.4), o leite de cal, do sector do dissolvedor (2.1.2), e energia sob a forma de vapor de água proveniente da cogeração.

O líquido filtro, antes de ser alimentado à coluna de destilação, é aquecido de modo a libertar o dióxido de carbono que contém, o que se consegue por troca térmica com os gases de saída da própria coluna de destilação. Segue-se a reação do líquido filtro com o leite de cal, que decompõe o cloreto de amónio, no líquido filtro, em cloreto de cálcio e amoníaco (Reação 2.13) (7).



Reação 2.13 – Reação do leite de cal ($Ca(OH)_2$) com o líquido de filtro (NH_4Cl) para dar origem a cloreto de cálcio ($CaCl_2$) e amoníaco (7).

Por fim, na coluna de destilação o amoníaco é removido, por injeção de vapor na base da coluna, assim a corrente gasosa rica em amoníaco e com algum dióxido de carbono, designada amoníaco recuperado, é enviada para o sector da absorção. Por outro lado, a corrente líquida quente que abandona a coluna, denominada líquido da destilação, é enviada para outras unidades de produção onde será feito um reaproveitamento térmico.

2.2. Descrição do sector da soda leve na Póvoa

A melhoria energética ou do funcionamento de um equipamento, requer um conhecimento pormenorizado do seu funcionamento, como tal, e no âmbito desta dissertação de mestrado, estudou-se com alguma profundidade o funcionamento dos dois equipamentos que constituem o sector de soda leve da unidade de produção de soda na Póvoa de Santa Iria: o filtro rotativo sob vácuo e o secador de soda leve, a fim de se fazer um bom plano de melhoria.

2.2.1. Filtro rotativo sob vácuo na Póvoa

Como já foi mencionado, de uma forma geral um filtro é utilizado para executar uma operação unitária de separação sólido-líquido. Contudo, neste filtro rotativo sob vácuo (Figura 2.2), para além da filtração da suspensão de bicarbonato de sódio (proveniente do sector da carbonatação), é executada a lavagem do sólido e a sua secagem (8).



Figura 2.2 – Filtro rotativo no sector de soda leve da Póvoa de Santa Iria.

Desta forma, o bom funcionamento deste equipamento traduz-se no cumprimento de dois objetivos (8):

- Remover a quantidade máxima de água do bicarbonato de sódio, de forma a obter um produto o mais seco possível, o que permite diminuir os consumos energéticos no secador de soda leve;
- Não ultrapassar as 1 - 10 xx de cloretos por 1 xx de soda densa (11), cumprindo os limites máximos estabelecido para o teor de cloretos no bicarbonato de sódio e soda leve (parâmetros de qualidade). No entanto, deve-se minimizar a quantidade de água de lavagem, de forma a minimizar igualmente o volume de líquido filtro que é enviado para

o sector da destilação, diminuindo, também, o consumo de energia, sob a forma de vapor, e o consumo de leite de cal neste sector.

a. Constituição do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa

De forma a cumprir, da melhor forma, as funções para que é requerido, o filtro rotativo sob vácuo tem na sua constituição uma série de componentes que contribuem para o funcionamento eficaz do equipamento, de forma a obter um produto final com a qualidade desejada.

Pode-se então agrupar os componentes em três categorias:

- Estrutura móvel;
- Estrutura fixa;
- Componentes complementares.

i. Estrutura móvel

Esta estrutura é constituída por três peças que, como um todo, executam um movimento rotacional segundo o eixo do tambor cilíndrico. Este tambor cilíndrico está coberto por uma tela filtrante de aço inoxidável (Figura 2.3) e apresenta, conectada ao esqueleto externo do tambor cilíndrico, uma estrutura interna composta por alvéolos (12).



Figura 2.3 – Fotografia da tela filtrante sobre o tambor cilíndrico do filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da *Solvay* em Portugal.

ii. Estrutura fixa

Por sua vez, a estrutura fixa é constituída por dois componentes instalados na extremidade do tambor. Estas duas peças apesar de estarem em contacto com a estrutura móvel não acompanham o seu movimento (13).

Assim, a primeira peça (Figura 2.4) em contacto com a estrutura móvel, o disco distribuidor, permite direccionar o tipo de vácuo adequado, vácuo de fixação ou geral, ar comprimido ou até mesmo a ausência de qualquer um destes, consoante a zona onde o alvéolo se encontra (13).

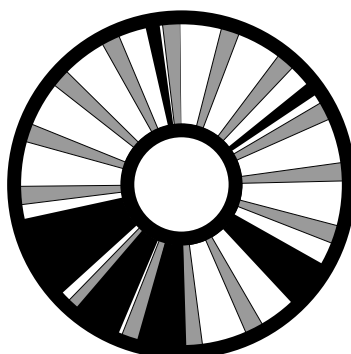


Figura 2.4 – Esquema representativo do disco distribuidor, a preto, do filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da *Póvoa* (13).

Existe ainda uma segunda peça, o separado, fixo ao disco distribuidor, que possibilita a separação do líquido e do gás filtro, sendo o primeiro enviado pela tubagem inferior e o segundo pela superior, como mostra a Figura 2.5. É também nesta peça que são aplicados os dois tipos de vácuo, geral e de fixação, e o ar comprimido (13).



Figura 2.5 – Fotografia do separador do líquido filtro, pela tubagem inferior, e do gás filtro, pela tubagem superior, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa.

iii. Componentes complementares

Por fim, existem alguns componentes que permitem complementar o funcionamento do filtro, estes são:

- Cuba, estrutura que admite a suspensão de bicarbonato de sódio e onde o tambor do filtro está mergulhado;
- Dispersores e respetivos suportes, as rampas de lavagem, ambos intervenientes na operação de lavagem (Figura 2.6a);
- Rolos compressores que permitem uniformizar e comprimir o bolo antes, inferior, e depois, superior, da lavagem (Figura 2.6a e Figura 2.6b), a fim de executar uma melhor secagem;
- Agitador da cuba para a homogeneização da suspensão de bicarbonato de sódio, para que a fase sólida não se deposite no fundo da cuba;
- Faca que possibilita o corte e recolha do bolo, que posteriormente é enviado para o secador de soda leve.

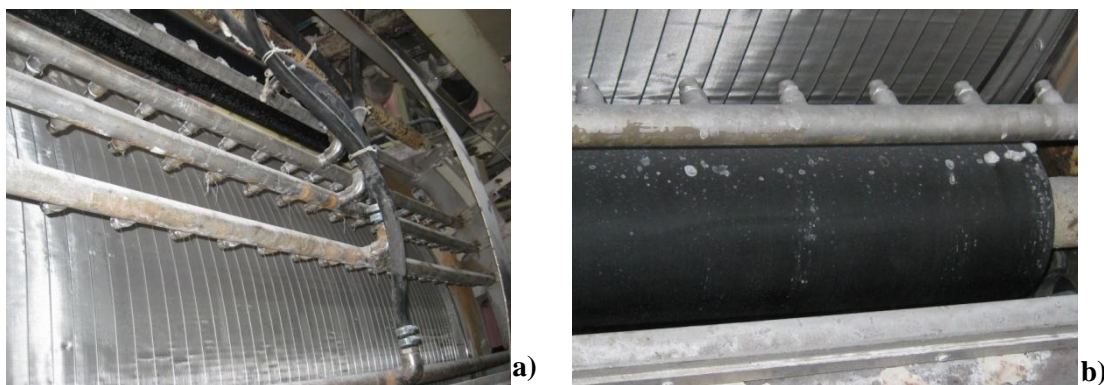


Figura 2.6 – Fotografias de alguns dos componentes complementares do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa: a) Em primeiro plano os dispersores e os respetivos suportes, no topo da imagem, o rolo compressor superior a preto; b) Rolo compressor inferior.

b. Funcionamento do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa

No decorrer de uma revolução completa do tambor, a tela passa por diferentes áreas que se encontram sob a ação ou de vácuo de fixação, ou de vácuo geral, ou ainda de ar comprimido, consoante a posição do alvéolo relativamente ao disco distribuidor (Figura 2.7).

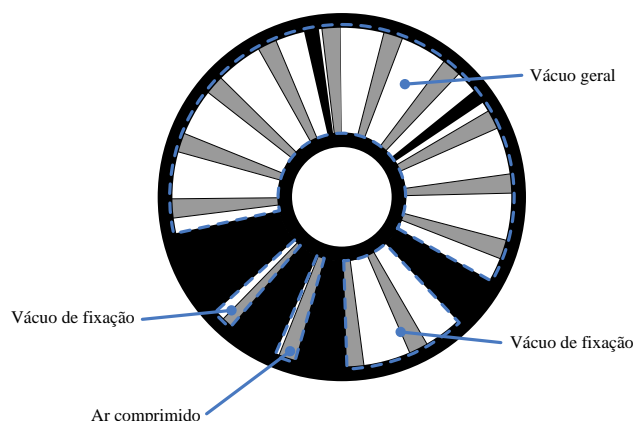


Figura 2.7 - Esquema representativo das zonas delimitadas pelo disco distribuidor, a preto, e dos respetivos tipos de vácuo, de fixação ou geral, ou ar comprimido, para o filtro rotativo sob vácuo na Póvoa. Em segundo plano, a cinzento tem-se a estrutura interna do tambor, onde as cavidades a branco representam os alvéolos (14).

Com a participação dos componentes complementares criam-se seis zonas de operação principais: filtração, secagem intermédia, lavagem, secagem, recolha do bicarbonato de sódio e sopragem (Figura 2.8 e Figura 2.9). Segue-se uma descrição detalhada de cada uma delas.

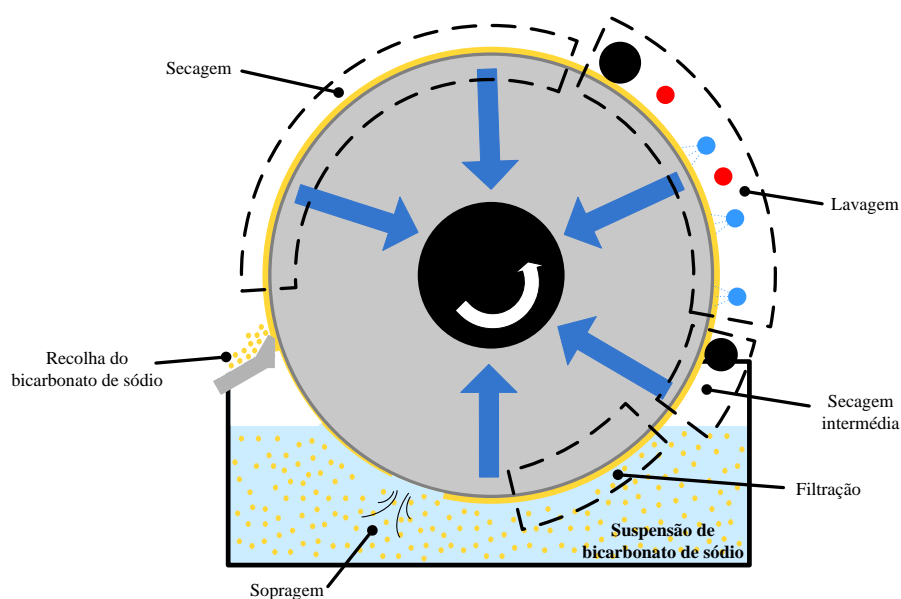


Figura 2.8 – Esquema representativo das várias zonas de operação pelas quais o bolo (camada amarela) passa durante uma revolução completa do tambor do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa. A camada amarela representa o bolo de bicarbonato de sódio, os dois círculos pretos na periferia do tambor (estrutura cinzenta) representam os rolos compressores, os círculos azuis representam as rampas de lavagem em funcionamento e os encarnados as fora de serviço (13).

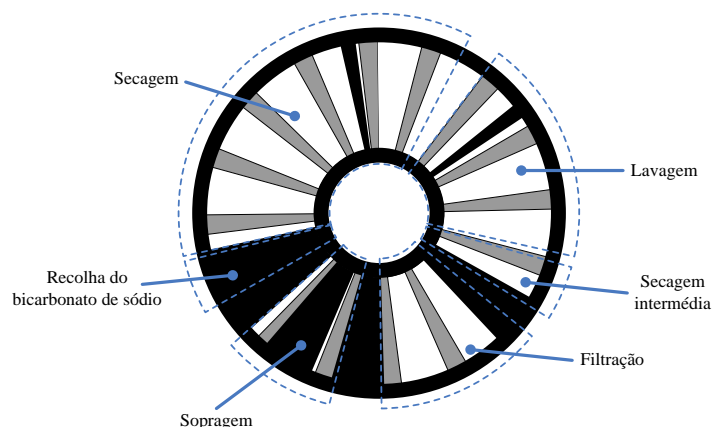


Figura 2.9 – Esquema representativo do disco distribuidor e respectivas zonas de operação, utilizado no filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da *Solvay* em Portugal. A cinzento tem-se a estrutura interna do tambor, onde as cavidades a branco representam os alvéolos. A preto tem-se a estrutura do disco distribuidor e pelas zonas translúcidas ocorre a passagem de líquido e gás filtro (14).

i. Filtração

O processo inicia-se com a introdução, na cuba, da suspensão de bicarbonato de sódio vinda do sector da carbonatação. Nesta está mergulhado parcialmente o tambor, que sobre a ação do vácuo de fixação, separa o bicarbonato de sódio, fase sólida, das suas águas mãe, fase líquida (Figura 2.10), formando-se uma camada de bicarbonato sobre a tela, o bolo, de espessura variável (13).

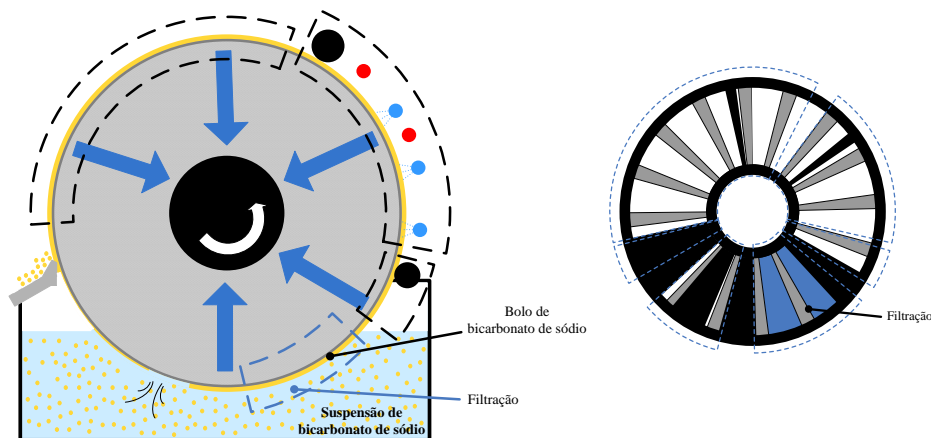


Figura 2.10 – Esquemas representativos da zona de operação de filtração, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

ii. Secagem intermédia

Esta etapa (Figura 2.11) permite uma primeira secagem do bolo de bicarbonato de sódio, durante um curto período de tempo, por ação do vácuo geral e em contacto com o ar. Todas as etapas de secagem permitem também diminuir o teor de cloretos no bicarbonato de sódio, uma vez, que a ação do vácuo

permite remover as águas mãe ricas em cloretos. A fim de ajudar a eliminar as águas mães, ainda nesta etapa, o bolo passa pelo primeiro rolo compressor onde é comprimido contra a tela (13).

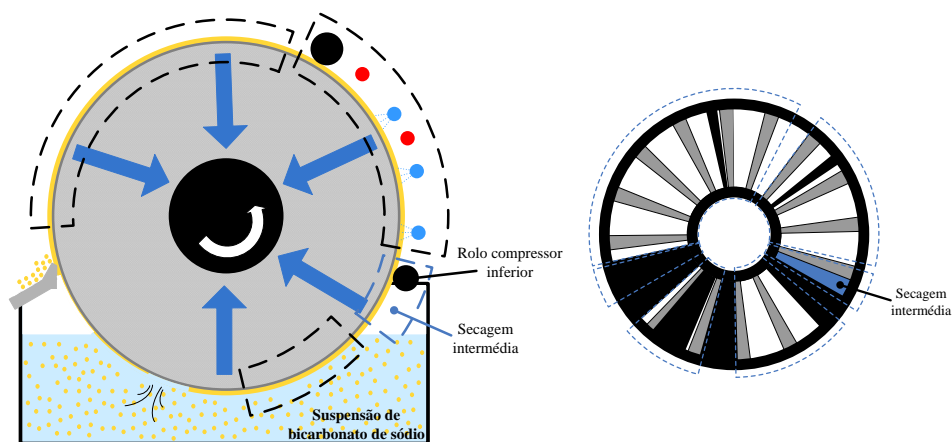


Figura 2.11 - Esquemas representativos da zona de operação de secagem intermédia, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

iii. Lavagem

Nesta zona o objetivo, como já mencionado, é eliminar o teor de cloretos do produto resultante da filtração, de forma a se obter um produto final com a qualidade exigida pelo cliente. Para tal, a zona de lavagem (Figura 2.12) utiliza cinco rampas de lavagem, cada uma com capacidade de acomodar 18 dispersores (13).

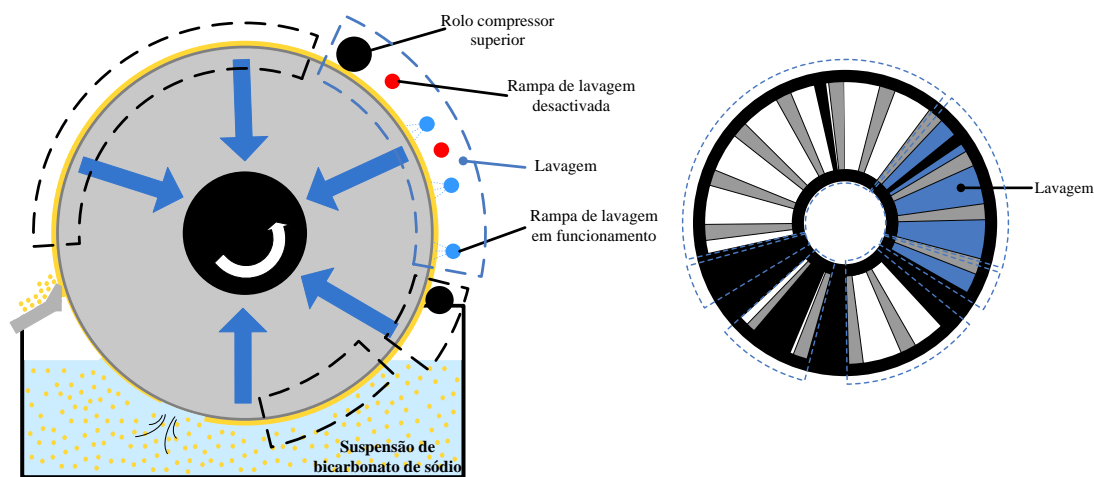


Figura 2.12 - Esquemas representativos da zona de operação de lavagem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

Contudo, o sucesso desta etapa depende em grande parte da forma como estes componentes estão dispostos ao longo desta zona, assim, a determinação da distância adequada entre as rampas de

lavagem, do número de dispersores por rampa e da distância dos dispersores ao bolo são elementos chave. Através de estudos efetuados ao longo dos anos chegou-se à configuração atual, apresentada na Figura 2.13 (15).



Figura 2.13 – Configuração das rampas de lavagem no filtro rotativo sob vácuo no complexo industrial da Solvay em Portugal.

Apesar de estarem instaladas cinco rampas de lavagem, os estudos realizados permitiram concluir que, para obter um produto conforme⁷, apenas devem estar em operação três rampas, a azul na Figura 2.12: a segunda, com apenas 16 dispersores e a quarta e a quinta, ambas com 18 dispersores (15).

Para além do número de dispersores, a segunda rampa de lavagem distingue-se das outras duas em operação por utilizar água de lavagem com uma origem diferente. Assim, a água de lavagem da rampa dois é uma mistura de água desmineralizada e de condensados oriundos do sector de destilação, denominada água destilação, por outro lado, a água de lavagem das rampas quatro e cinco é na sua totalidade composta por condensados resultantes do arrefecimento, no lavador, do gás extraído do secador de soda leve, denominada água lavador (15).

Tendo em conta o objetivo da lavagem do bolo de bicarbonato de sódio, o teor de cloretos da água de lavagem da rampa dois deve ser monitorizada pelo operador encarregue do sector de soda leve, uma vez que, pontualmente pode exceder o valor limite que permite uma lavagem adequada deste bolo (15).

Esta etapa é executada sob a ação do vácuo geral e, ainda dentro desta, depois da superfície bolo sofrer o impacto do jacto dos dispersores, e ainda sob a ação do vácuo geral, o bolo é uniformizado e comprimido pelo rolo de compressão superior (13).

⁷ Produto que cumpre os limites estabelecidos para os parâmetros de qualidade.

iv. Secagem

Ainda sob a ação do vácuo geral, nesta zona pretende-se eliminar a maior quantidade de águas mãe e de água de lavagem no bolo de bicarbonato de sódio. Contudo a zona de secagem (Figura 2.14) tem uma duração superior à de secagem intermédia sendo cerca de seis vezes mais longa (13).

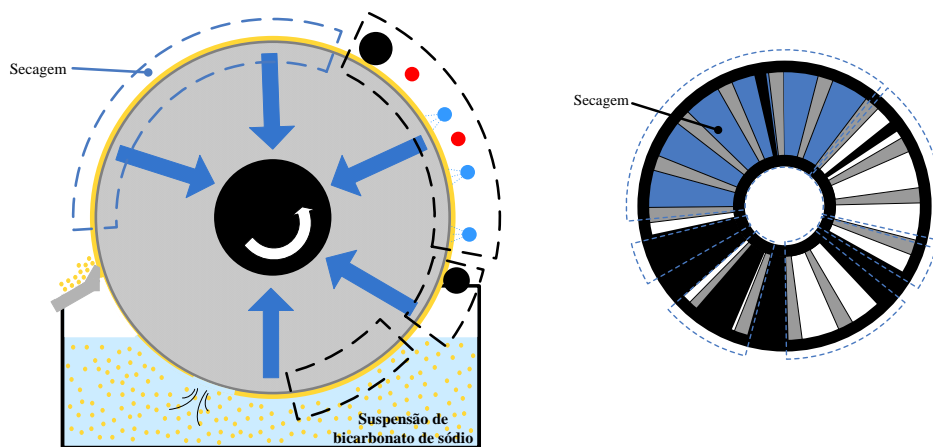


Figura 2.14 - Esquemas representativos da zona de operação de secagem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

v. Recolha de bicarbonato de sódio

Nesta fase o bolo de bicarbonato de sódio já passou por todas as zonas que permitem obter o produto com a qualidade desejada, no que diz respeito ao teor de cloretos e à humidade.

Desta forma, sem a ação nem de vácuo nem de ar comprimido, é apenas necessário recolher o bicarbonato de sódio para depois ser encaminhado para a próxima etapa, os secadores de soda leve. Esta operação é concretizada com recurso a uma faca instalada depois da zona de secagem (Figura 2.15), a cerca de 3 xx da tela. Por conseguinte, fica uma camada de cerca de 3 xx de produto na tela, sem deixar que esta fique completamente descoberta, o que provocaria a perda do vácuo (15).

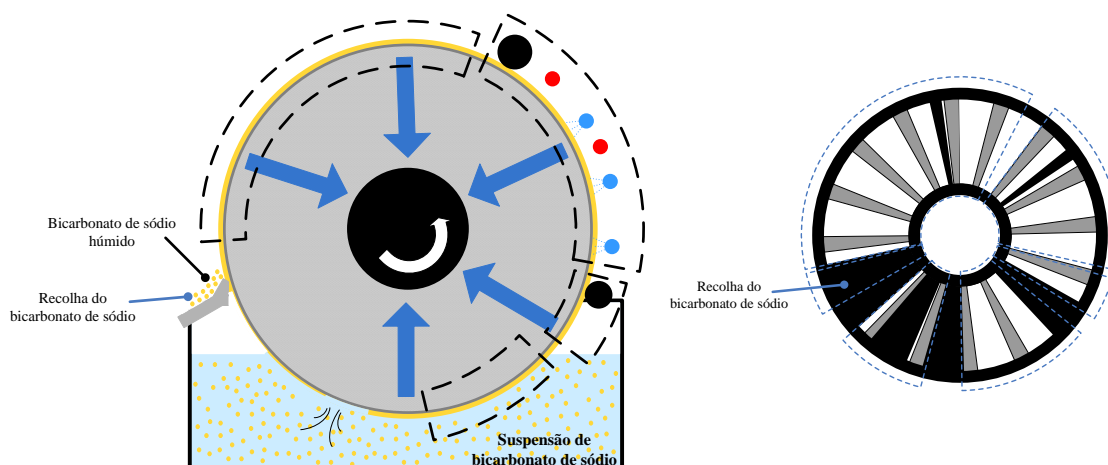


Figura 2.15 - Esquemas representativos da zona de operação de recolha de bicarbonato de sódio, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

vi. Sopragem

Proveniente da zona anterior, chega um bolo muito compacto com uma espessura de cerca de 3 xx. Contudo, para que esta camada compacta de bolo sobre a tela possa ser removida na zona de sopragem, existe uma zona intermédia depois da zona de recolha de bicarbonato de sódio onde, por ação do vácuo de fixação, se humedece esta camada (Figura 2.16) deixando-a menos compacta para posteriormente ser removida com mais facilidade (13).

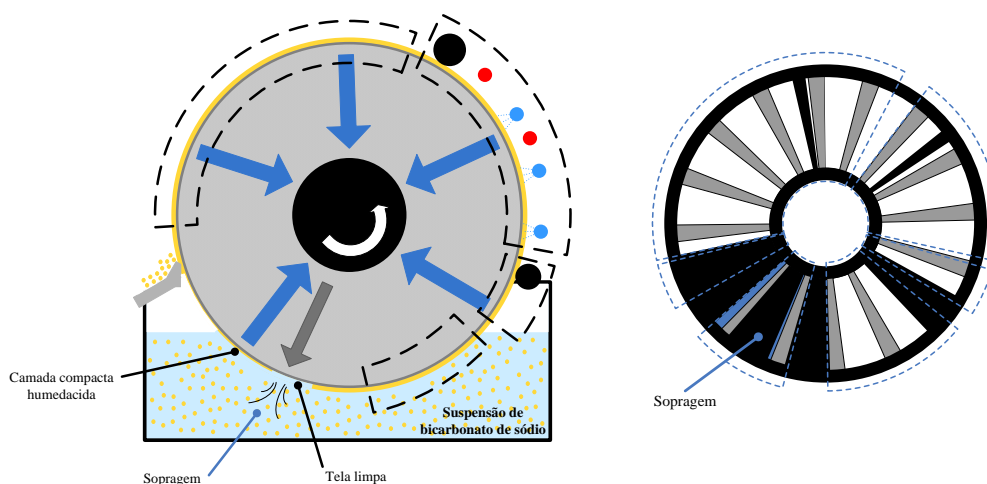


Figura 2.16 - Esquemas representativos da zona de operação de sopragem, no tambor e no disco distribuidor, do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa (14) (13).

Desta forma, na última zona de operação, é introduzido ar comprimido de forma a eliminar por completo a camada, já menos compacta e humedecida, que permaneceu na tela depois da faca ter passado, ver Figura 2.16 (13).

Esta etapa é de grande importância, uma vez que, a variabilidade do produto na Póvoa é superior à dos outros complexos industriais. Pelo que, pode obter-se um produto com uma granulometria para a qual a tela não está preparada, o que pode fazer com que a tela vede (13). Assim, se esta etapa não for eficaz, aquando da próxima revolução, o equipamento não estará a trabalhar nas melhores condições o que culmina num produto com qualidade não previsível.

c. Variáveis de controlo do filtro rotativo sob vácuo na Póvoa

De forma a otimizar este equipamento, para além de conhecer o modo de funcionamento do mesmo, apresentado anteriormente, é necessário identificar as várias variáveis do processo de filtração.

Segundo a classificação das variáveis em: variáveis de entrada (manipuladas ou de carga) e de saída (medidas ou não medidas), segue-se a Tabela 2.1 com a listagem das variáveis de controlo no processo de filtração (17).

Tabela 2.1 – Listagem das variáveis de controlo no processo de filtração com respetiva classificação e unidades (com base em (17) e (18)).

Variáveis	Classificação	Unidades
Rotação do tambor	Variável de entrada - manipulada	xx
Vácuo de fixação	Variável de entrada - manipulada	xx
Vácuo geral	Variável de entrada - manipulada	xx
Nível da cuba	Variável de entrada - manipulada	xx
Débito água destilação	Variável de entrada - manipulada	xx
Débito água lavador	Variável de entrada - manipulada	xx
Densidade suspensão bicarbonato de sódio	Variável de entrada – manipulada*	xx
Temperatura água destilação	Variável de entrada - carga	°C
Temperatura água lavador	Variável de entrada - carga	°C
Teor de cloretos água destilação	Variável de entrada - carga	xx
Espessura bolo	Variável de saída - medida	xx
Teor de cloretos bicarbonato de sódio	Variável de saída - medida	xx
Humidade bicarbonato de sódio	Variável de saída - não medida	xx

* Apesar de se poder ajustar a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, como existe uma grande variabilidade da qualidade desta suspensão, esta variável também deve ser considerada uma variável de carga.

2.2.2. Secador de soda leve na Póvoa

Como já foi mencionado no subcapítulo 2.1.4, o bicarbonato de sódio lavado e seco no filtro rotativo sob vácuo entra no secador de soda leve onde é calcinado, por aquecimento com vapor de água, para no final se obter o carbonato de sódio leve com a qualidade exigida (Reação 2.10).

Para tal, é necessário ter à disposição um equipamento capaz de executar esta tarefa nas melhores condições, tem-se então um secador cilíndrico rotativo (Figura 2.17).



Figura 2.17 – Secador de soda leve no complexo industrial da Solvay em Portugal (entrada do bicarbonato de sódio na extremidade do secador mais distante e saída do carbonato de sódio leve, alimentação do vapor de água e saída do vapor de água condensado na extremidade do secador mais próxima).

O bicarbonato de sódio começa por cair por gravidade, proveniente do sector do filtro rotativo sob vácuo, para dentro do secador (na Figura 2.17 corresponde à extremidade do secador mais distante), simultaneamente é alimentado o vapor de água e removido o vapor de água condensado (na Figura 2.17 corresponde à extremidade do secador mais próxima), ambos pelo eixo central (15).

Já dentro do secador o bicarbonato de sódio entra em contacto com a superfície externa das serpentinas (Figura 2.18), onde circula o vapor de água, que cobrem, em várias camadas, toda a superfície interna do secador de forma a conseguir uma transferência de calor mais eficiente do vapor de água para o bicarbonato de sódio.

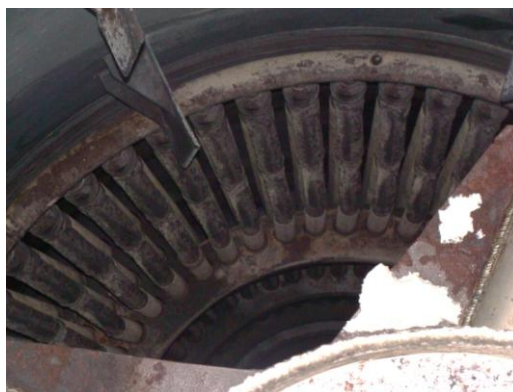
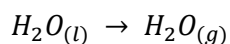
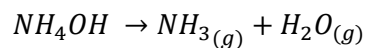


Figura 2.18 – Serpentinhas dentro do secador de soda leve, na Póvoa, junto à parede interna.

Para além da reação principal de calcinação do bicarbonato de sódio, ocorrem mais duas outras reações, uma vez que o bicarbonato de sódio entra no secador com humidade e com algum amoníaco. Por conseguinte existem duas reações que devem ser tidas em conta, aquando da elaboração do balanço energético deste equipamento, são elas a evaporação da humidade do bicarbonato de sódio (Reação 2.14) e a libertação do amoníaco (Reação 2.15).



Reação 2.14 - Evaporação da humidade do bicarbonato de sódio a vapor de água, por aumento da temperatura (8).



Reação 2.15 – Libertação do amoníaco presente no bicarbonato de sódio (NH_4OH) a amoníaco no estado gasoso, por aumento da temperatura (19).

2.3. Balanços Energéticos

O conhecimento dos requisitos energéticos de um processo, através dos balanços energéticos, permite identificar de que forma a energia é utilizada nos processos e sugerir áreas onde é possível conservar e reduzir os consumos energéticos (20). A existência de conservação de energia num sistema, descrita pela primeira lei da termodinâmica, pode ser traduzida pela Equação 2.1 que permite uma primeira avaliação da energia do sistema (20).

$$\text{Variação da energia interna} = \text{Energia total transferida para o sistema}$$

Equação 2.1

Desta forma, admitindo um sistema (Figura 2.19) em estado estacionário, onde não ocorre trabalho, onde ocorrem reações químicas, as correntes de entrada e saída são consideradas misturas ideais e a pressão constante, a equação geral do balanço de energia pode ser descrita pela Equação 2.2 (21).

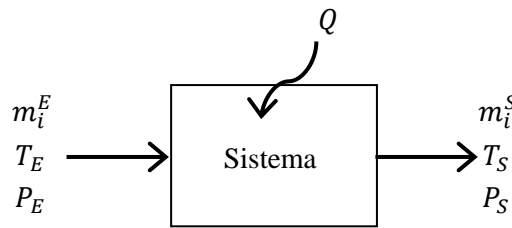


Figura 2.19 – Sistema com uma corrente de entrada (E) e uma corrente de saída (S), onde T e P representam a temperatura e pressão da corrente, respetivamente, m_i representa a quantidade do componente i em cada uma das correntes e Q corresponde à quantidade de calor transferido (21).

$$Q = \sum m_i^S \left(\Delta H_{f,i}^0 + \int_{T_0}^{T_S} C p_i(T) dT \right) - \sum m_i^E \left(\Delta H_{f,i}^0 + \int_{T_0}^{T_E} C p_i(T) dT \right)$$

Equação 2.2

Onde:

- $\Delta H_{f,i}^0$ – Entalpia padrão de formação do componente i (kJ/kg);
- $C p_i(T)$ – Calor específico em função da temperatura do componente i (kJ/kg.K).

Por trás desta equação geral existem conceitos que permitem determinar a quantidade de energia consumida para sistemas que apenas diferem do anterior por serem mais simples. São exemplo as variações entálpicas que se seguem (20):

- Entalpia padrão da reação, quando ocorre uma reação química (ΔH_r°);

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{produtos} m_i \times \Delta H_{f,i}^\circ - \sum_{reagentes} m_i \times \Delta H_{f,i}^\circ$$

Equação 2.3

- Variação entálpica padrão quando ocorre uma transição de estado de uma substância (ΔH_{trs}°);
- Variação entálpica aquando da variação de temperatura de uma substância (ΔH), sem ocorrer mudança de estado.

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} Cp(T) dT$$

Equação 2.4

De forma a calcular estes três parcelas, é necessário saber os valores da variação de entalpia padrão de formação dos compostos do sistema ($\Delta H_{f,i}^\circ$), da variação de entalpia padrão por transição de estado (ΔH_{trs}°) e do calor específico dos compostos do sistema ($Cp(T)$).

Apesar dos dois primeiros serem valores tabelados, os valores de calor específico são funções que dependem da temperatura, e como tal, para obter o valor da variação entálpica por variação de temperatura, é necessário determinar o integral da função do calor específico.

3. Metodologias

Este capítulo está dividido em dois subcapítulos, sendo que no primeiro é aplicado o modelo energético do projeto *Solwatt* ao secador de soda leve, de forma a quantificar os consumos energéticos de cada um dos passos do seu funcionamento. Por outro lado no segundo subcapítulo (3.2) é descrita a metodologia de melhoria de duas das etapas que apresentam o contributo mais significativo no consumo energético do secador total de soda leve.

3.1. Balanço energético

Como já foi mencionado, o sector de soda leve é constituído por dois equipamentos, o secador e o filtro. Contudo, foi estabelecido, aquando da implementação do projeto de energia *Solwatt*, que o modelo seria apenas aplicado aos equipamentos com maior consumo energético, excluindo os consumos energéticos dos motores associados aos equipamentos.

Assim, e tendo em conta que no caso do filtro rotativo sob vácuo o consumo energético está apenas associado aos motores que permitem a rotação do tambor, que acionam o movimento do agitador e que alimentam a bomba de vácuo, a metodologia do projeto *Solwatt*, neste sector, é apenas aplicada aos secadores de soda leve, não contabilizando o consumo energético dos motores que permitem a sua rotação.

Este modelo aborda o balanço energético aos secadores de uma maneira distinta do proposto pela Equação 2.2. Nesta metodologia opta-se por determinar três patamares energéticos: primeiro determina-se o consumo energético total ao longo do ano (Q na equação geral do balanço energético), seguindo-se a determinação do consumo energético para o melhor desempenho e, por fim, estima-se o consumo energético teórico.

Depois de calcular a energia total consumida pelos secadores, são subtraídas algumas parcelas, como mostra a Tabela 3.1. As primeiras duas correspondem às perdas associadas ao funcionamento dos secadores fora da curva de melhor desempenho, sendo que as restantes sete, selecionadas com base no conhecimento adquirido do funcionamento destes equipamentos, contabilizam a energia consumida por etapas que representam perdas para estes dois equipamentos. Apesar de existirem dois secadores, 1 e 2, no complexo da Póvoa, que consomem vapor a pressões e a temperaturas diferentes, o balanço energético é aplicado aos dois secadores como um todo, não sendo, por isso, detalhados os cálculos por secador.

Tabela 3.1 - Listagem dos três patamares energéticos dos secadores e das parcelas que representam as perdas energéticas.

	Nomenclatura
Consumo energético total dos secadores	$E_{secador}$
– Perda energética por variação de marcha	E_{marcha}
– Perda energética por variação de desempenho	$E_{desempenho}$
Consumo energético para o melhor desempenho dos secadores	E_{md}
– Perda energética por perda de soda leve	E_a
– Perda energética por perda de calor através da superfície externa do secador	E_b
– Perda energética por aquecimento do bicarbonato de sódio seco	E_c
– Perda energética por aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio	E_d
– Perda energética por sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio	E_e
– Perda energética por aquecimento do ar	E_f
– Perda energética por ocorrer a reação de libertação do amoníaco	E_g
Consumo energético teórico	$E_{teórico}$

No que diz respeito aos cálculos, admite-se que todos os compostos são puros, que o sistema secadores-atmosfera se encontra em estado estacionário e que todos os cálculos entálpicos são feitos a pressão constante.

Por fim, definiu-se que esta metodologia será aplicada aos secadores de soda leve tendo por base os dados recolhidos durante o ano de 2011.

3.1.1. Consumo energético total dos secadores

Neste passo é estimada a energia associada ao consumo energético total dos secadores, durante 2011, $E_{secador}$. Uma vez que a única fonte de energia destes equipamentos é a transferida pelo vapor para o bicarbonato de sódio húmido, o seu consumo energético total (Equação 3.1) corresponde à subtração

da energia do vapor condensado que sai dos secadores ($E_{vapor\ cond}$) à energia do vapor que é alimentado (E_{vapor}).

$$E_{secador} = E_{vapor} - E_{vapor\ cond}$$

Equação 3.1

A energia do vapor alimentado aos secadores é calculada, pela Equação 3.2, multiplicando a quantidade de vapor consumida em 2011 ($m_{i_{vapor2011}}$) pela entalpia⁸ do vapor à pressão e à temperatura do mesmo ($H_{i_{vapor(P,T)}}$), para os secadores 1 e 2.

$$E_{vapor} = \sum (m_{i_{vapor2011}} \times H_{i_{vapor(P,T)}})$$

Equação 3.2

A quantidade de vapor consumida em 2011 corresponde à soma dos valores registados pelo contador, instalado à entrada da alimentação de vapor de cada secador, e o valor da pressão e da temperatura do vapor alimentado correspondem aos valores médios dos registados em 2011.

Por outro lado, a energia do vapor condensado que sai dos secadores é determinada, pela Equação 3.3, multiplicando a quantidade de vapor consumida em 2011 pela entalpia do vapor condensado à pressão do vapor alimentado e à temperatura de saturação para esta pressão ($H_{i_{vaporcond(P,T_{sat})}}$), para ambos os secadores.

$$E_{vapor\ cond} = \sum (m_{i_{vapor2011}} \times H_{i_{vaporcond(P,T_{sat})}})$$

Equação 3.3

3.1.2. Consumo energético para o melhor desempenho dos secadores

O segundo patamar do consumo energético destes equipamentos consiste em estimar o consumo energético que os secadores apresentariam caso tivessem trabalhado todo o ano segundo o melhor desempenho verificado em 2011.

⁸ O valor da entalpia do vapor a temperatura e a pressão conhecidas é determinado com recurso a tabelas ou diagramas.

De forma a avaliar o desempenho energético dos secadores, e como tal selecionar o período em que estes apresentaram um melhor desempenho, é elaborado um gráfico com os valores de 2011 do seu consumo energético por tonelada de bicarbonato de sódio produzida, consumo energético específico dos secadores (Equação 3.4), em função da quantidade de bicarbonato de sódio consumida por hora, ao longo de 2011.

$$Cesp_{secador_i} = \frac{E_{vapor_i}}{m_{BiSh_i}}$$

Equação 3.4

Assim, a partir da nuvem de pontos de 2011, e com base em estudos desenvolvidos pelo projeto *Solwatt*, chegou-se à equação de uma curva que permite descrever o melhor desempenho dos equipamentos.

Obtém-se, então, a equação da curva de melhor desempenho (cd) que estima os valores para os quais os secadores têm o melhor desempenho energético em função da quantidade de bicarbonato de sódio produzida. Com esta curva é possível estimar qual o consumo energético específico mínimo dos secadores, a partir do qual é estimado o valor das perdas provocadas por variação de quantidade de bicarbonato de sódio húmido consumido (E_{marcha}), isto é, consoante a produção de soda leve, denominada marcha dos secadores. Por outro lado, as perdas provocadas pela dispersão, para a mesma marcha, dos pontos relativamente à curva de melhor desempenho, permite estimar o valor das perdas por desempenho ($E_{desempenho}$).

Desta forma, subtraindo ao consumo energético total dos secadores estas duas parcelas obtém-se o consumo energético para o melhor desempenho dos secadores (E_{md}) (Equação 3.5).

$$E_{md} = E_{secador} - E_{marcha} - E_{desempenho}$$

Equação 3.5

3.1.3. Consumo energético teórico

Para estimar o consumo energético teórico ($E_{teórico}$) subtrai-se ao consumo energético para o melhor desempenho dos secadores, as etapas do funcionamento destes que representam perdas para estes dois equipamentos (Equação 3.6). Tem-se então a lista destas perdas energéticas:

- E_a - Perdas energéticas por perda de soda leve;
- E_b - Perda energética por perda de calor através da superfície externa dos secadores;
- E_c - Perda energética por aquecimento do bicarbonato de sódio seco;
- E_d - Perda energética por aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio;
- E_e - Perda energética por sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio;
- E_f - Perda energética por aquecimento do ar;
- E_g - Perda energética por ocorrer a reação de libertação do amoníaco.

$$E_{teórico} = E_{md} - E_a - E_b - E_c - E_d - E_e - E_f - E_g$$

Equação 3.6

a. Perdas energéticas por perda de soda leve

As perdas energéticas que advêm da perda de soda leve ocorrem por três razões distintas:

- Devolução do produto (soda leve), uma vez que não está de acordo com os critérios de qualidade que o cliente exige;
- Perda de produto entre a peça móvel e fixa dos equipamentos;
- Lavagens periódicas agendadas dos secadores.

A estimativa da massa perdida em cada uma das parcelas é efetuada de acordo com os registos existentes no departamento, podendo calcular-se quantas toneladas de soda leve são desperdiçadas, por ano, para o conjunto das parcelas ($prod_{SLperdida}$). Desta forma, é possível determinar as perdas energéticas (E_a), recorrendo à Equação 3.7.

$$E_a = - \frac{prod_{SLperdida}}{prod_{SL2011}} \times E_{secador}$$

Equação 3.7

Nesta etapa, o valor da massa de soda leve produzida em 2011 ($prod_{SL2011}$) é retirado do relatório anual da Póvoa.

b. Perda energética por perda de calor através da superfície externa do secador

A fim de determinar esta perda é necessário determinar a quantidade de energia que se perde através da superfície dos secadores em 2011. Para tal é necessário conhecer a área de superfície externa dos secadores cilíndricos (A_{SSL}), a espessura da parede de ambos (l), a condutividade térmica da parede (k_T) e a temperatura no interior dos secadores e a ambiente (T_{int} e T_{ext}).

Tendo por base documentos técnicos que descrevem as dimensões dos equipamentos e informações adicionais concedidas por um especialista do processo do carbonato de sódio, é possível saber a A_{SSL} , superfície externa de um cilindro com as dimensões do secador de soda leve da Póvoa, a l e a k_T . Por outro lado, a temperatura no interior do secador foi definida como a média dos valores de temperatura de saída da soda leve registados em 2011 e a temperatura no exterior dos secadores como a média dos valores da temperatura ambiente registados durante 2011 na fábrica

Desta forma, pela Equação 3.8, é possível quantificar a energia perdida, durante 2011, através da superfície externa dos secadores (E_b).

$$E_b = -A_{SSL} \times \frac{k_T}{l} \times (T_{int} - T_{ext}) \times 31536000$$

Equação 3.8

O último termo desta equação permite obter a energia perdida através da superfície externa, durante um ano, já que um ano tem 31536000 segundos.

c. Perda energética por aquecimento do bicarbonato de sódio seco

Nesta etapa pretende-se quantificar a energia consumida, em 2011, para elevar a temperatura do bicarbonato de sódio sem humidade (E_c), desde a temperatura de entrada nos secadores, do bicarbonato de sódio húmido (T_{BiSh}), até à temperatura da reação de calcinação ($T_{reação}$). Sabendo o valor da massa molar do bicarbonato de sódio seco (MM_{BiS}) e da soda leve (MM_{SL}) e estimando a T_{BiSh} , através de uma medição pontual da temperatura do bicarbonato de sódio húmido imediatamente antes de entrar nos secadores, com recurso a uma pistola de laser, fica apenas por determinar o calor específico do bicarbonato de sódio.

Desta forma, com base na Equação 2.4, é possível determinar a energia necessária para aquecer a massa de bicarbonato de sódio seco, da T_{BiSh} até à $T_{reação}$, pela equação que se segue (Equação 3.9).

$$E_c = -\frac{2 \times MM_{BiS}}{MM_{SL}} \times prod_{SL2011} \times \int_{T_{BiSh}}^{T_{reação}} Cp(T)_{BiS} dT$$

Equação 3.9

d. Perda energética por aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio

Como o intuito de determinar a energia consumida, em 2011, para aquecer a humidade contida no bicarbonato de sódio (E_d), desde a temperatura de entrada nos secadores, do bicarbonato de sódio húmido (T_{BiSh}), até à temperatura da reação de calcinação ($T_{reação}$), é necessário quantificar a humidade presente no bicarbonato de sódio (h_{BiSh}) e conhecer a entalpia da água a duas temperaturas diferentes, temperatura da reação e temperatura de entrada do bicarbonato de sódio húmido nos secadores, à pressão atmosférica, 1,013 bar.

Assim sendo, define-se o valor da humidade presente no bicarbonato de sódio como a média dos resultados do laboratório em 2011, e calcula-se o valor das entalpias tal como foi determinado no subcapítulo 3.1.1. Desta forma é possível, pela Equação 3.10, determinar a energia consumida nesta etapa.

$$E_d = -prod_{SL2011} \times \frac{h_{BiSh}}{100} \times (H_{H_2O_{reação}} - H_{H_2O_{BiSh}})$$

Equação 3.10

e. Perda energética por sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio

Nesta etapa é feita a quantificação da energia consumida, em 2011, para sobreaquecer o dióxido de carbono, a água e a soda leve (produtos da reação de calcinação, Reação 2.10), e ainda a humidade no bicarbonato de sódio (E_e), desde a temperatura de reação ($T_{reação}$), até à temperatura de saída da soda leve para o melhor desempenho dos secadores (T_{int-md}), segundo a Equação 3.11.

$$E_e = -(E_{e_{H_2O}} + E_{e_{CO_2}} + E_{e_{SL}} + E_{e_{hBiS}})$$

Equação 3.11

No entanto é necessário discriminar as quatro parcelas desta equação: o sobreaquecimento da água ($E_{e_{H_2O}}$), do dióxido de carbono ($E_{e_{CO_2}}$), da soda leve ($E_{e_{SL}}$) e da humidade no bicarbonato de sódio

($E_{e_{hBiS}}$); de forma a obter o resultado final da perda energética desta etapa (Equação 3.12, Equação 3.13, Equação 3.14 e Equação 3.15).

$$E_{e_{H_2O}} = \frac{MM_{H_2O}}{MM_{SL}} \times prod_{SL2011} \times (H_{H_2O_{int-md}} - H_{H_2O_{reação}})$$

Equação 3.12

$$E_{e_{CO_2}} = \frac{MM_{CO_2}}{MM_{SL}} \times prod_{SL2011} \times \int_{T_{reação}}^{T_{int-md}} Cp(T)_{CO_2} dT$$

Equação 3.13

$$E_{e_{SL}} = prod_{SL2011} \times \int_{T_{reação}}^{T_{int-md}} Cp(T)_{SL} dT$$

Equação 3.14

$$E_{e_{hBiS}} = prod_{SL2011} \times h_{BiS} \times (H_{H_2O_{int-md}} - H_{H_2O_{reação}})$$

Equação 3.15

Para poder determinar o valor das perdas energéticas das parcelas definiu-se a T_{int-md} como a temperatura de saída da soda leve no período em que os secadores tiveram o melhor desempenho, calculou-se o valor da massa molar da água, dióxido de carbono e soda leve e , por fim, determinou-se o calor específico do carbonato de sódio e dióxido de carbono.

f. Perda energética por aquecimento do ar

Nesta etapa é quantificada a energia consumida, em 2011, para aquecer o ar (E_f), que entra, inevitavelmente, para o interior dos secadores, desde a temperatura ambiente (T_{ext}), até à temperatura de saída da soda leve para o melhor desempenho destes equipamentos, em 2011 (T_{int-md}).

Para tal, estimou-se o volume de ar que entra nos secadores, por tonelada de soda leve⁹, que multiplicado pela densidade do ar (22) permite obter a quantidade de ar que entra nos secadores, por tonelada de soda leve (m_{ar}). Adicionalmente, considerando o valor do calor específico do ar

⁹ Valor estimado com base num estudo feito pelo Engenheiro Carte Michelin.

independente da temperatura (22), é possível, pela Equação 3.16, determinar a energia consumida nesta etapa.

$$E_f = m_{ar} \times prod_{SL2011} \times Cp_{ar} \times (T_{int-md} - T_{ext})$$

Equação 3.16

g. Perda energética por ocorrer a reação de libertação do amoníaco

Por último, tem-se a perda energética associada à reação de libertação, pela Reação 2.15, do amoníaco presente no bicarbonato de sódio húmido (E_g). Para tal, sabendo o valor médio, em 2011, da quantidade de amoníaco por tonelada de soda leve (m_{NH_3})¹⁰ e determinando a entalpia desta reação (19) (ΔH_r), é possível determinar a energia desta etapa (Equação 3.17).

$$E_g = m_{NH_3} \times prod_{SL2011} \times \Delta H_r$$

Equação 3.17

¹⁰ Informação obtida através do relatório anual da Solvay Portugal.

3.2. Melhoria energética

Depois de aplicada a metodologia adotada pelo projeto *Solwatt* para quantificar os consumos energéticos dos secadores de soda leve da Póvoa, selecionaram-se as etapas que representam as perdas mais significativas relativamente ao consumo energético dos dois equipamentos e, posteriormente, foram traçadas estratégias de melhoria.

O primeiro passo para a escolha das estratégias de melhoria, de cada etapa, correspondeu à realização de um *brainstorming*, onde foram reunidos colaboradores dos departamentos de fabricação e de manutenção de vários níveis hierárquicos, que contactam diariamente com os equipamentos deste sector. Cada *brainstorming* inicia-se com uma pequena apresentação da metodologia, onde são evidenciadas as principais perdas energéticas, seguindo-se o período reservado à exposição das ideias, que permitirão criar estratégias de melhoria.

Como tal, e depois da avaliação das cerca de 41 ideias de melhoria propostas para as várias etapas, foram selecionadas, no âmbito da realização desta dissertação de mestrado, duas propostas de melhoria para duas etapas distintas. São estas etapas:

- O sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio;
- O aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio.

3.2.1. Sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio

Uma vez que esta parcela contabiliza a energia consumida pelos secadores para aquecer os produtos da reação de calcinação e a humidade do bicarbonato de sódio da temperatura da reação de calcinação até à temperatura de saída da soda leve, para o melhor desempenho dos dois secadores em 2011, a melhoria desta parcela passa por diminuir o valor médio da temperatura de saída de soda leve registado em 2011, contudo no âmbito desta dissertação de mestrado esta melhoria será apenas implementada no secador 1.

Desta forma, estabeleceu-se um valor objetivo (indicador de atividade, KAI) para a temperatura de saída da soda leve, com base nos resultados do funcionamento do secador 1 em 2011. Assim, sabendo que a temperatura de saída da soda leve, aquando do melhor desempenho dos dois secadores nesse ano, foi, aproximadamente, 100 - 300 °C, estabeleceu-se 100 - 300±4 °C como intervalo de trabalho para o indicador de atividade.

A fim de implementar o KAI na sala de controlo de soda leve, dia 21 de Maio de 2012 realizou-se uma reunião com os colaboradores da fabricação, dos vários níveis hierárquicos, responsáveis pelo sector de soda leve, onde foi apresentado o valor do intervalo estabelecido para o KAI da temperatura de saída de soda leve juntamente com um sinótico, construído no *software Aspen*, que lhes permite acompanhar, em linha, o valor desta temperatura e, por meio de um código de cores¹¹, saber se esse valor está, ou não, dentro do intervalo estabelecido para o KAI. No decorrer dessa reunião foi, também, dada a conhecer a importância do cumprimento do KAI, sensibilizando os colaboradores para a possibilidade de diminuir o consumo de vapor no secador 1 relativamente ao consumo de 2011, aquando do cumprimento deste indicador de atividade, o que resulta numa diminuição da fatura energética anual do complexo industrial.

Desta forma, com a implementação do intervalo para o KAI, o operador da sala de controlo do sector da soda leve passa a fazer um controlo em linha do valor da temperatura de saída do produto do secador, de modo a respeitar o intervalo estabelecido. No final de cada turno, fará ainda uma análise com a sua chefia para discutir algumas dificuldades que tenham surgido durante o seu período de trabalho que justifiquem as oscilações anómalas da temperatura de saída da soda leve e, como tal, concluir eventuais ações de melhoria a implementar.

Com a aplicação deste intervalo para o KAI é possível, caso seja respeitado, diminuir a temperatura de saída de soda leve relativamente à média dos valores de 2011. Assim, depois de determinar a média dos valores da temperatura de saída da soda leve registados após a implementação do intervalo para o KAI (T_{KAI}), é possível determinar um ganho ($Ganho_{KAI}$), em toneladas de vapor, relativamente à média dos valores do secador 1 em 2011, ($T_{secador\ 1}$) sabendo a energia consumida para aumentar um grau na temperatura de saída da soda leve por tonelada de soda leve (E_{SL}), a entalpia do vapor à pressão e à temperatura do mesmo ($H_{1vapor(P,T)}$) e a entalpia do vapor condensado à pressão do vapor alimentado e à temperatura de saturação para esta pressão ($H_{1vaporcond(P,T_{sat})}$), pela Equação 3.18.

$$Ganho_{KAI} = \frac{(T_{secador\ 1} - T_{KAI}) \times E_{SL} \times prod_{SL2011}}{H_{1vapor(P,T)} - H_{1vaporcond(P,T_{sat})}}$$

Equação 3.18

¹¹ Verde corresponde ao cumprimento do intervalo do KAI e encarnado ao incumprimento.

3.2.2. Aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio

Neste subcapítulo pretende-se compreender um pouco melhor o modo de funcionamento do filtro rotativo sob vácuo do complexo industrial da *Solvay* em Portugal, com o objetivo de perceber qual o efeito da variação da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio na regulação do funcionamento do filtro e, como tal, compreender como poderá ser feita uma melhoria da etapa de aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio, por diminuição da humidade neste produto.

A necessidade de conhecer o funcionamento do filtro rotativo sob vácuo do complexo industrial na Póvoa está diretamente ligada ao facto desta fábrica ser a única no grupo que recorre a um processo descontínuo, reatores em *batch*, para realizar a reação de carbonatação, o que resulta num produto da carbonatação com uma qualidade tão variável quanto o número de reatores em operação.

Como tal, serão realizados alguns estudos, suportados por ensaios nos filtro rotativo sob vácuo, para, pela primeira vez, se tentar compreender qual o impacto da variabilidade da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, uma vez que a carbonatação ocorre em reatores *batch*, na qualidade e na humidade do bicarbonato de sódio. Por fim este estudo será complementado com alguns ensaios realizados para compreender o impacto de algumas variáveis manipuladas, nomeadamente, o vácuo de fixação, o vácuo geral, o nível da cuba e o débito da água de lavagem, no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio.

Quando se pretende otimizar um equipamento, é muito importante ter um conhecimento prévio do seu funcionamento, para tal, antes de qualquer plano de ensaios, procedeu-se a um período de formação, que teve por base uma formação teórica, complementada pela leitura de documentos, e uma formação prática que consistiu em acompanhar os condutores da sala de controlo do sector da soda leve durante os seus turnos, de forma a adquirir sensibilidade e conhecimento à cerca do modo de funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, permitindo compreender como, onde e dentro de que limites as várias variáveis manipuladas são ajustadas.

Adquiridos estes conhecimentos, são estabelecidos uma série de critérios que precedem a recolha das amostras, a fim de tentar garantir que os ensaios decorrem nas condições previamente estabelecidas, uma vez que se tratam de ensaios em equipamentos industriais. Estes critérios são aplicados antes da realização do ensaio propriamente dito, o que permite criar um plano de ensaios bem estruturado. Desta forma, criou-se um procedimento composto por seis passos, utilizado para todos os ensaios realizados no filtro rotativo sob vácuo:

- Prever a hora do ensaio, de forma a garantir uma densidade constante ao longo do mesmo;

- Aproximadamente quinze minutos antes da hora prevista do ensaio ajustar as várias variáveis manipuladas para os valores pretendidos;
- Imediatamente antes da recolha das amostras de bicarbonato de sódio registar os valores de todas as variáveis;
- Recolher nove amostras de bicarbonato de sódio;
- Registar novamente os valores de todas as variáveis;
- Determinar a humidade e o teor de cloretos do bicarbonato de sódio das amostras recolhidas.

De todas as variáveis de entrada listadas na Tabela 2.1, fixar valores para as variáveis manipuladas é o procedimento mais simples. Pelo contrário, para o caso das variáveis de carga, já que não podem ser ajustadas, a solução encontrada passou por registar os valores das mesmas durante os ensaios.

No entanto, de entre todas as variáveis, existe uma variável de entrada que representa uma exceção, a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio. Esta, apesar de poder ser ajustada pelo condutor, não é medida, uma vez que, não existe um equipamento para tal. Por outro lado, o facto de estar dependente da qualidade da suspensão aumenta a complexidade do controlo desta variável, desta forma, optou-se por planear cada ensaio de maneira a que, durante a sua realização, apenas o conteúdo de um carbonatador esteja dentro da cuba do filtro, tentando assim garantir, da melhor forma, que o produto recolhido durante o ensaio é resultado de um único carbonatador, e assim tentar assegurar uma densidade constante ao longo do ensaio.

Estabilizadas e registadas as condições do ensaio, procede-se à recolha de nove amostras, por ensaio, que consistem em três repetições de uma recolha de três amostras ao longo do tambor do filtro rotativo sob vácuo. Assim, recolhe-se a primeira amostra a 40 cm da extremidade esquerda, a segunda no centro do tambor (98 cm de ambas as extremidades) e a terceira a 40 cm da extremidade direita, e repete-se este conjunto de três recolhas mais duas vezes, para que no final do ensaio se tenha uma amostra representativa do funcionamento do filtro nas condições definidas. Posteriormente determina-se a humidade e o teor de cloretos do bicarbonato de sódio de cada uma das nove amostras e calcula-se a média dos nove valores para as duas variáveis de saída, obtendo-se, então, por ensaio, um valor para a humidade e um valor para o teor de cloretos do bicarbonato de sódio.

Para além da determinação do teor de cloretos e da humidade do bicarbonato de sódio, é ainda determinada a última variável de saída, a espessura do bolo, recorrendo a uma medição manual.

Uma vez estruturado o procedimento e depois de ler alguns estudos também elaborados neste âmbito, definiram-se um conjunto de ensaios para compreender:

- A relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral;
- O impacto do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio;
- O impacto do vácuo de fixação, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio.

a. Relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral

Após o período de formação e de leitura dos vários documentos acerca do funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, compreendeu-se que o facto de na Póvoa se utilizarem reatores em *batch* para a carbonatação é um fator que poderá influenciar a regulação deste equipamento. Esta dificuldade surge, maioritariamente, pelo facto da qualidade da suspensão, ou seja, tamanho do grão do bicarbonato de sódio e quantidade de produto, não ser constante durante o funcionamento contínuo do filtro, variando, num dia de produção normal, de 18 em 18 minutos, já que corresponde ao tempo que decorre entre a descarga de dois reatores consecutivos.

Como tal, e uma vez que não existem estudos realizados em complexos industriais com as condições de operação da Póvoa, este primeiro estudo pretende tentar compreender qual o impacto da variação da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, proveniente dos carbonatadores, na variação da espessura do bolo, do vácuo de fixação e do vácuo geral. Assim, opta-se por, numa primeira fase, regular a densidade da suspensão utilizando o líquido filtro para diluir a suspensão já dentro da cuba, recorrendo à válvula que permite a introdução de líquido filtro na cuba, chamada válvula cuba.

Assim, de forma a compreender a relação da densidade da suspensão de bicarbonato de sódio com a espessura do bolo, com o vácuo de fixação e com o vácuo geral realizou-se um primeiro conjunto de dois ensaios onde se estabeleceram as condições das variáveis manipuladas do filtro rotativo sob vácuo, como apresentado na Tabela 3.2, sendo a abertura da válvula à entrada da cuba, que possibilita a regulação da densidade, a única variável que difere do ensaio A.1 para o A.2.

Tabela 3.2 – Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os dois ensaios, A.1 e A.2.

Variáveis		Ensaio A.1	Ensaio A.2
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹²)	40	40
	Válvula cuba	Fechada	Aberta

Desta forma, no primeiro ensaio (A.1) a válvula cuba foi fechada na totalidade, enquanto que, no segundo ensaio (A.2) essa mesma válvula foi totalmente aberta, com o intuito de obter um valor superior de densidade da suspensão no primeiro ensaio.

Numa segunda fase, com o intuito complementar o estudo do efeito da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio nas variáveis mencionadas, realizaram-se mais dois conjuntos de ensaios onde mais uma vez se estabeleceram condições semelhantes para as variáveis manipuladas do filtro rotativo sob vácuo para cada conjunto de ensaios, como apresentado na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4.

¹² Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

Tabela 3.3 – Listagem das condições estabelecidas para as variáveis manipuladas dos ensaios A.3 e A.4.

Variáveis		Ensaio A.3	Ensaio A.4
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹⁶)	0	0
	Válvula cuba	-	-

Tabela 3.4 - Listagem das variáveis manipuladas e das respectivas condições estabelecidas para os ensaios, A.5 e A.6.

Variáveis		Ensaio A.5	Ensaio A.6
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹³)	0	10
	Válvula cuba	-	-

Contudo, para estes quatro ensaios a densidade da suspensão não foi regulada, não tendo sido registada a posição da válvula cuba, nem determinado o valor da densidade da suspensão.

¹³ Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

b. Impacto do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio

Depois de compreendida a relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo e o vácuo geral pretende-se entender qual o impacto da variação do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio, como tal, realizaram-se um conjunto de dois ensaios.

Tal como no conjunto de ensaios A.3 e A.4 e no conjunto A.5 e A.6, para este conjunto de dois ensaios, B.1 e B.2, estabeleceram-se condições idênticas para ambos os ensaios, excetuando a regulação da densidade da suspensão de bicarbonato, uma vez que não foi determinado o seu valor, nem registada a posição da válvula cuba, pelo que, entre ensaios a densidade poderá variar. Segue-se a Tabela 3.5 onde estão apresentadas as condições dos ensaios B.1 e B.2.

Tabela 3.5 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os dois ensaios, B.1 e B.2.

Variáveis		Ensaio B.1	Ensaio B.2
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹⁴)	30	40
	Válvula cuba	-	-

c. Impacto do vácuo de fixação, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio

Após as várias formações teóricas e práticas, complementadas com a leitura de documentação, selecionaram-se três variáveis de funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, a fim de compreender o efeito da sua manipulação na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato.

¹⁴ Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

Inicialmente pretendeu-se compreender o impacto da variação da espessura na humidade e teor de cloretos do produto. Como tal, optou-se por fazer dois estudos para duas variáveis diferentes mas que, à partida, permitem variar a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o nível da cuba.

Desta forma, com o intuito de compreender o efeito da variação do valor de *set point* do vácuo de fixação na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio, realizaram-se cinco ensaios distintos onde se estabeleceram condições de ensaio semelhantes entre eles variando, apenas, o valor do vácuo fixo. Desta forma, estão apresentados os cinco ensaios e as respetivas condições de ensaio para as variáveis manipuladas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Listagem das variáveis manipuladas e das respetivas condições estabelecidas para os ensaios, C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5.

Variáveis		Ensaio C.1	Ensaio C.2	Ensaio C.3	Ensaio C.4	Ensaio C.5
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1	30,1	30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹⁵)	30	0	30	0	10
	Válvula cuba	-	-	-	-	-

Por outro lado, de forma a compreender qual o impacto da variação do nível da cuba na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio, realizaram-se quatro ensaios. Para tal, estabeleceram-se as condições semelhantes para este conjunto de ensaios, variando-se apenas o nível da cuba. Segue-se a Tabela 3.7 onde se apresentam as condições destes quatro ensaios.

¹⁵ Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

Tabela 3.7 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os quatro ensaios, D.1, D.2, D.3 e D.4.

Variáveis		Ensaio D.1	Ensaio D.2	Ensaio D.3	Ensaio D.4
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		35,0	31,5	30,1	28,0
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (% ¹⁶)	10	30	30	0
	Válvula cuba	-	-	-	-

Por fim, realizam-se quatro ensaios a fim de compreender o impacto do débito de água de lavagem na humidade e no teor de cloretos, este estudo surge uma vez que se desconhece o impacto da variação desta variável na humidade do bicarbonato de sódio e, por outro lado, pretende-se compreender qual o impacto da variação do débito da água de lavagem no teor de cloretos do bicarbonato de sódio.

Contudo, uma vez que no filtro rotativo sob vácuo da Póvoa se recorre a dois tipos de água para fazer a lavagem do bolo, optou-se por regular apenas o débito da água do lavador, uma vez que, é utilizado em duas das três rampas de lavagem. Como tal, realizaram-se quatro ensaios tendo sido estabelecidas condições de ensaio semelhantes para todos eles, variando apenas o débito da água do lavador. Na Tabela 3.8 estão apresentadas as condições estabelecidas para os quatro ensaios.

¹⁶ Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

Tabela 3.8 - Lista das variáveis manipuladas e das condições estabelecidas para os ensaios E.1, E.2, E.3 e E.4.

.Variáveis		Ensaio E.1	Ensaio E.2	Ensaio E.3	Ensaio E.4
Rotação do tambor (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Vácuo de fixação (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Vácuo geral (xx)		-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500	-10 - -500
Nível da cuba (xx)		30,1	30,1	30,1	30,1
Débito água destilação (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Débito água lavador (xx)		1 - 10	1 - 10	1 - 10	1 - 10
Densidade SBiS	Válvula tanques (%¹⁷)	30	30	10	30
	Válvula cuba	-	-	-	-

Porém, tal como acontece no conjunto de dois ensaios mencionados na alínea anterior, não é feita a regulação da densidade da suspensão de bicarbonato, pelo que, entre os ensaios dos três estudos não é garantida uma densidade constante.

¹⁷ Percentagem de abertura da válvula borboleta, sendo 100% a válvula totalmente aberta e 0% a válvula totalmente fechada.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo serão, inicialmente, apresentados e discutidos os resultados obtidos aquando do balanço energético ao secador e, por fim, os resultados obtidos para as duas melhorias, a primeira ligada ao sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio e, a segunda, ao aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio.

4.1. Balanço energético

O primeiro resultado da implementação da metodologia do projeto *Solwatt*, nos secadores de soda leve, corresponde à obtenção da curva de melhor desempenho a partir dos valores do consumo energético específico em função da quantidade de bicarbonato de sódio produzida em 2011 (Figura 4.1), como descrito em 3.1.2.

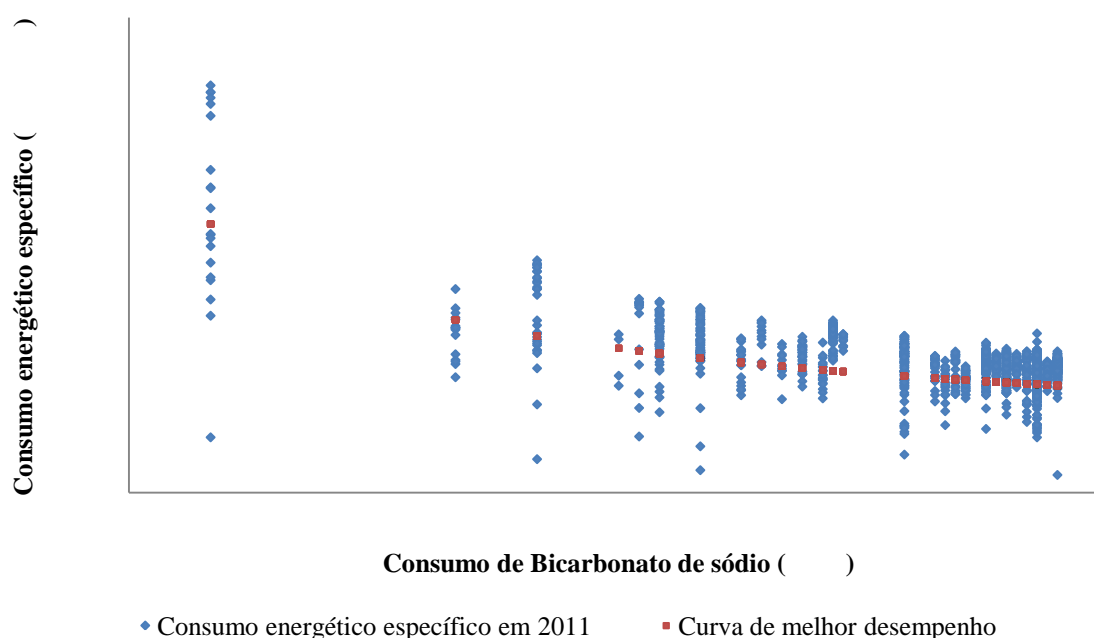


Figura 4.1 – Representação do consumo energético específico por tonelada consumida de bicarbonato de sódio e da curva de melhor desempenho.

A obtenção desta curva permite estimar as perdas energéticas resultantes da variação da quantidade de soda leve produzida (E_{marcha}), e as que resultam do facto de, para a mesma marcha, se verificarem consumos energéticos específicos variáveis ($E_{desempenho}$). Assim, estimou-se que 1 - 5 % do consumo energético total dos secadores correspondem à perda de marcha e que 5 - 20 % do consumo energético total dos secadores perfaz a perda de desempenho.

De forma a diminuir estas perdas a estratégia poderá passar por produzir a uma marcha mais estável, idealmente por volta das 0 - 200 toneladas de BiS por hora, e tentar operar os secadores sobre a curva de melhor desempenho, uma vez que, em 2011, se provou possível.

Por fim, a partir da curva de melhor desempenho sobreposta com os valores do consumo energético específico de 2011, é possível localizar os períodos onde o consumo energético específico foi menor. Este valor corresponde ao menor consumo energético específico estimado pela curva de melhor desempenho.

Assim, com esta informação e com os restantes dados utilizados para completar o balanço energético ao secador, segundo a metodologia *Solwatt*, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 4.2, onde estão representados os consumos energéticos dos três patamares e as parcelas que representam as perdas energéticas dos dois secadores.

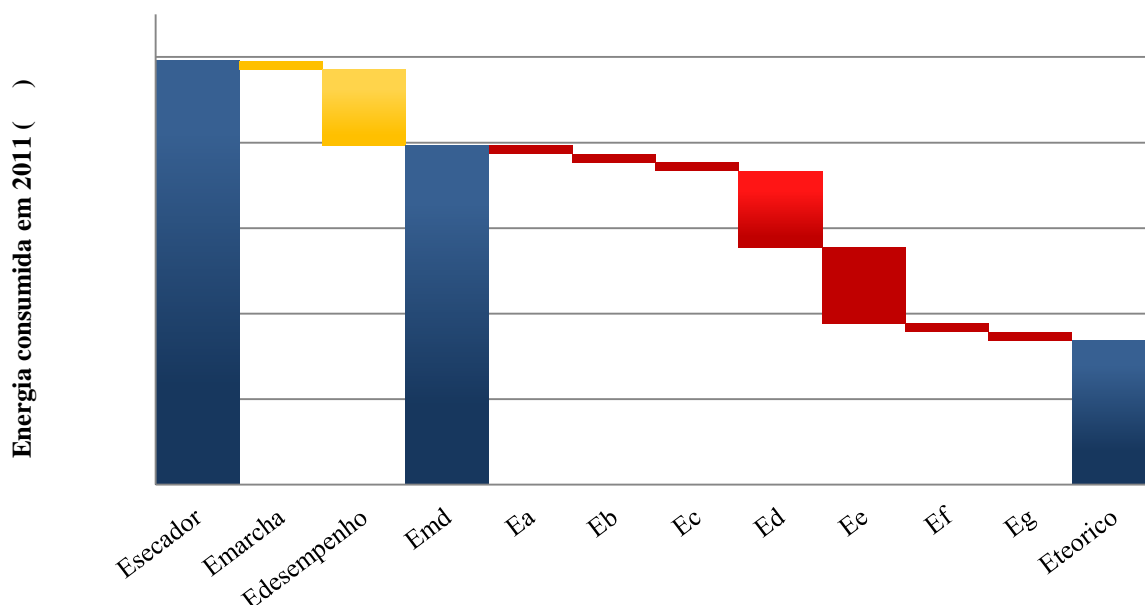


Figura 4.2 – Representação gráfica dos consumos energéticos dos três patamares, a azul, e das parcelas, a amarelo e encarnado, que representam as perdas energéticas dos dois secadores em 2011¹⁸.

Esta figura (Figura 4.2) é uma ferramenta que permite facilmente identificar quais as parcelas que consomem mais energia, o que permite focar os esforços de melhoria nessas mesmas parcelas, uma vez que a possibilidade de retorno será mais significativa. Evitando assim investir tempo, competências e dinheiro em projetos cujo retorno é menor do que o de parcelas com maior impacto.

¹⁸ Os valores de todas as parcelas representadas neste gráfico não correspondem aos valores reais.

4.2. Melhoria energética

Depois de estimados os consumos energéticos dos secadores, foram seleccionadas as etapas a melhorar. No âmbito desta dissertação de mestrado são seleccionadas duas das três parcelas que consomem mais energia (Figura 4.2), são estas a energia consumida para aquecer a humidade contida no bicarbonato de sódio (E_d), que representa 10 - 40 % do consumo total dos secadores, e a energia consumida para sobreaquecer os produtos da reacção de calcinação e a humidade contida no bicarbonato de sódio (E_e), que representa 2 - 15 % do consumo total dos secadores.

4.2.1. Sobreaquecimento dos produtos da reacção de calcinação e da humidade do bicarbonato de sódio

Após a implementação do intervalo para o KAI na sala de controlo da soda leve e até ao final do mês de Julho constata-se, pela Figura 4.3, uma diminuição significativa da temperatura de saída da soda leve no secador 1 relativamente ao período que lhe precede. Desta forma, relativamente à média dos valores no período que decorre entre 26 de Abril e 21 de Maio de 2012, aproximadamente 100 - 300 °C, verifica-se uma diminuição de 12 °C na média dos valores de temperatura no período de 22 de Maio a 31 de Julho de 2012.

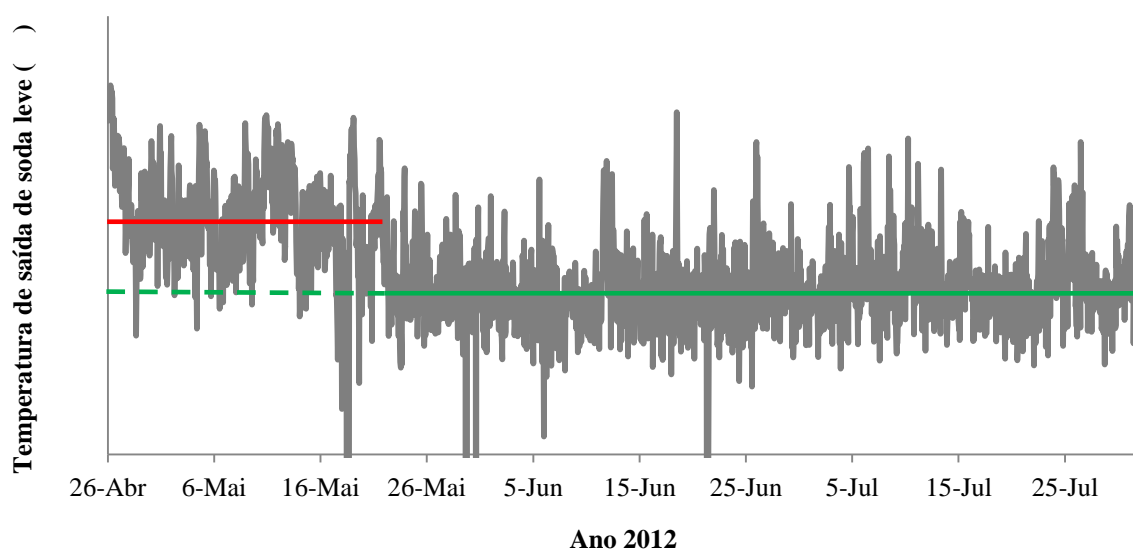


Figura 4.3 - Evolução da temperatura de saída da soda leve do secador 1, em 2012, desde 26 de Abril a 31 de Julho, sendo a reta encarnada a média dos valores no período que decorre entre 26 de Abril e 21 de Maio de 2012 e a reta verde a média dos valores no período de 22 de Maio a 31 de Julho de 2012.

Uma vez que se pretende melhorar o funcionamento do secador 1 relativamente ao funcionamento deste em 2011 determina-se o retorno, em toneladas de vapor, resultante da diminuição do consumo de vapor do secador por implementação do intervalo para o KAI a 21 de Maio de 2012. Assim, ao

comparar a média dos valores da temperatura de saída da soda leve em 2011 com a média dos valores da mesma durante o período de 21 de Maio de 2012 até ao final de Julho constata-se que houve uma diminuição de, aproximadamente, 9 °C o que representa um ganho, em vapor, de cerca de 200 - 6000 xx por ano, relativamente à média das temperaturas do secador 1 de 2011.

4.2.2. Aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio

Com o intuito de compreender da melhor forma o modo de operação do filtro rotativo sob vácuo da Póvoa e tentar perceber como se pode diminuir a parcela de energia consumida referente ao aquecimento da humidade no bicarbonato de sódio, realizaram-se um conjunto de ensaios de forma a compreender o funcionamento do filtro e da influência de algumas variáveis de controlo na qualidade do produto final.

É de notar que, não é do âmbito deste estudo compreender o impacto das três variáveis de carga (temperatura água destilação, temperatura água lavador e teor de cloretos água destilação) na qualidade do bicarbonato de sódio filtrado, apesar de todas elas serem monitorizadas em todos os ensaios.

a. Relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral

No caso do primeiro conjunto de ensaios (A.1 e A.2), como já foi mencionado no capítulo 3, optou-se por fazer variar a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, por regulação da válvula cuba, mantendo as restantes condições semelhantes, de modo a compreender a relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Lista com algumas das variáveis registadas nos dois ensaios, A.1 e A.2, onde se variou a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.

Ensaio	Válvula cuba	Vácuo fixação (xx)	Vácuo geral (xx)	Espessura (xx)	Densidade SBiS (g/cm³)
A.1	Fechada	-240	-253	10 - 50	1,26
A.2	Aberta	-226	-226	10 - 50	1,21

Constatou-se que, apesar do *set point* estabelecido para o vácuo de fixação ter sido -240 xx para ambos os ensaios (Tabela 3.2), no segundo os valores registados não ultrapassaram os -226 xx (Tabela 4.1).

Como tal, é possível afirmar que a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio condiciona o vácuo de fixação, podendo mesmo impedir que sejam alcançados valores de vácuo de fixação superiores, em módulo. Da mesma forma, pelos resultados obtidos, constata-se que o valor observado para o vácuo geral é igualmente condicionado pela densidade da suspensão, registando-se, nestes dois ensaios, um valor para o vácuo geral menor, em módulo, aquando de uma densidade menor.

Este resultado já seria esperado, tendo em conta que o valor registado de vácuo geral depende apenas da resistência criada na tela pelo bolo. Assim, uma tela sem bolo regista um valor de vácuo geral de zero xx, pelo que, quanto maior a espessura do bolo maior a perda de carga gerada pelo produto sólido na tela e, consequentemente, maior, em módulo, o valor registado de vácuo geral.

Deste conjunto de ensaios (Tabela 4.1) também se verifica que da suspensão de bicarbonato de sódio no ensaio A.1, que regista um valor maior de densidade, resulta um bolo de bicarbonato de sódio, na zona de recolha do produto, com uma espessura superior. Contudo, estes dois ensaios não permitem compreender a influência do tamanho do grão do bicarbonato de sódio nos dois tipos de vácuo e na espessura do bolo e, por outro lado, não permitem que seja clara a atribuição da variação da espessura do bolo no ensaio A.2, relativamente ao A.1, apenas à variação da densidade da suspensão, uma vez que há variação do vácuo de fixação de um ensaio para o outro (Tabela 4.1) e sabe-se que uma das formas de regular a espessura do bolo é através do vácuo de fixação, quanto maior o seu valor, em módulo, maior a espessura do bolo.

Como tal, na Tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios A.3 e A.4 com o intuito de compreender, da melhor forma, as questões ligadas à possível variação da espessura do bolo por influência da densidade da suspensão.

Tabela 4.2 - Listagem de algumas das variáveis registadas nos ensaios A.3 e A.4, não tendo sido registados os valores da densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo todos os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.

Ensaio	Vácuo fixação (xx)	Vácuo geral (xx)	Espessura (xx)
A.3	-180	-219	10 - 50
A.4	-180	-270	10 - 50

Estes dois ensaios mostram que, para o mesmo valor de vácuo de fixação, se podem obter valores de vácuo geral diferentes. Desta forma, pelos resultados apresentados na Tabela 4.2 pode considerar-se,

que o facto de haver uma variação da densidade de suspensão, mesmo com um valor de vácuo de fixação igual, pode promover um aumento da espessura do bolo.

Analisando os resultados dos ensaios A.3 e A.4, pensa-se também que para uma suspensão de bicarbonato de sódio com uma densidade superior existe mais produto sólido disponível para a filtração, desta forma, obtém-se um bolo de maior espessura o que cria uma maior perda de carga e, consequentemente, um aumento do vácuo geral, em módulo.

Por outro lado, os resultados apresentados na Tabela 4.3 colocam em causa a conclusão retirada nos ensaios A.1, A.2, A.3 e A.4 quando se pensa que o vácuo geral depende, exclusivamente, do valor da espessura do bolo. Nos ensaios A.5 e A.6, constata-se que, apesar do vácuo geral do primeiro ser superior, a espessura do bolo é inferior, resultados que parecem contrariar os dos ensaios anteriores.

Tabela 4.3 - Lista com algumas das variáveis registadas nos ensaios A.5 e A.6, não tendo havido um registo dos valores da densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, sendo todos os valores apresentados a média dos valores registados antes e depois da recolha das amostras.

Ensaio	Vácuo fixação (xx)	Vácuo geral (xx)	Espessura (xx)
A.5	-200	-276	10 - 50
A.6	-200	-239	10 - 50

Desta forma constata-se que, para além da espessura do bolo, o tamanho do grão do bicarbonato de sódio também é um fator a ter em conta no valor da perda de carga provocada pelo bolo. Pensa-se então que, neste caso, o grão do sólido do ensaio A.5 é de menor dimensão criando uma perda de carga adicional ao bolo, para além da espessura do mesmo, o que culmina no aumento do vácuo geral, apesar de, comparativamente, a espessura do bolo ser menor.

Com base nestes seis ensaios é possível compreender que a variabilidade da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, nomeadamente a densidade e o tamanho do grão do sólido, tem um impacto significativo em algumas variáveis do funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, tais como nos dois tipos de vácuo e na espessura.

Como tal, pensa-se que a melhor forma de compreender, em linha, qual a qualidade da suspensão descarregada de cada um dos reatores *batch* é através do vácuo geral e da espessura do bolo, uma vez que, pelos ensaios apresentados, o vácuo geral parece ser uma variável que traduz a qualidade da suspensão, através da leitura da perda de carga do bolo, e complementado pela observação da

espessura do bolo permite fazer uma avaliação mais completa da qualidade da suspensão. Assim, aquando da análise dos resultados que se seguem deve ser feita uma avaliação combinada do valor registado do vácuo geral e da espessura do bolo de forma a compreender a qualidade da suspensão.

Por fim, com base na documentação lida e na formação prática e teórica adquirida sobre o funcionamento do filtro rotativo sob vácuo e da sua estrutura interna, aliado à informação adquirida pelos ensaios realizados, compreende-se que, o facto de na Póvoa se utilizarem reatores em *batch* para a carbonatação é um fator que influencia muitíssimo a regulação do filtro rotativo sob vácuo. Esta dificuldade surge, maioritariamente, pelo facto da qualidade da suspensão, ou seja, tamanho do grão do bicarbonato de sódio e quantidade de produto disponível para a filtração, não ser constante durante o funcionamento contínuo do filtro, variando, num dia de produção normal já que é o tempo que decorre entre a descarga de dois reatores consecutivos.

Como tal, propõe-se que a regulação da quantidade de bicarbonato de sódio filtrado, denominada marcha, passe a ser feita através da regulação do vácuo geral, atuando sobre a densidade da suspensão de bicarbonato de sódio, deixando de se regular a marcha com base na espessura do bolo e por manipulação do vácuo de fixação ou do nível da cuba.

b. Impacto do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio

No conjunto dos dois ensaios realizados para compreender o impacto da variação do valor do vácuo geral no teor de cloretos e na humidade do bicarbonato de sódio, criaram-se condições idênticas para os dois ensaios, variando apenas o valor do vácuo geral.

Apesar de, nos ensaios B.1 e B.2, não ter sido regulada nem determinada a densidade da suspensão, considera-se que o valor do vácuo geral traduz a qualidade da suspensão do bicarbonato de sódio, no que diz respeito à densidade e ao tamanho do grão, como explicado no estudo acima apresentado sobre a relação entre a qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, a espessura do bolo, o vácuo de fixação e o vácuo geral. Como tal, considera-se que estes dois ensaios se realizam em condições semelhantes excetuando o valor do vácuo geral.

Analisando os resultados destes dois ensaios (Tabela 4.4) é possível constatar que, no ensaio B.1, o aumento do valor do vácuo geral, em módulo, promove um aumento da humidade do bicarbonato de sódio, comparativamente com o valor registado no ensaio B.2.

Tabela 4.4 – Apresentação da média dos valores do vácuo geral, registados antes e depois da recolha das amostras, e da média dos valores do teor de cloretos e da humidade do bicarbonato de sódio das nove amostras recolhidas em cada ensaio.

Ensaio	Vácuo geral (xx)	Teor de cloretos BiS (xx)	Humidade do BiS (xx)
B.1	-266	0,01 - 0,30	5 - 20
B.2	-204	0,01 - 0,30	5 - 20

Pensa-se, então, que, comparando com os resultados do ensaio B.2, a razão pela qual se obtém um bicarbonato de sódio mais húmido no ensaio B.1, se deve ao facto, do bolo resultante desse ensaio criar uma maior resistência, perda de carga, à passagem da água para o interior do tambor, o que resulta num produto com mais água e num valor de vácuo geral superior, em módulo. Como tal, parece haver uma dificuldade acrescida quando se pretende remover a água intersticial e a água adsorvida ao sólido no ensaio B.1, em comparação com o ensaio B.2, resultando um bolo com uma espessura maior, resultados estes concordantes com estudos realizados em Dombasle.

Por outro lado, constata-se, para o mesmo conjunto de ensaios (Tabela 4.4), que, ao contrário do espectável, o valor do teor de cloretos no bicarbonato de sódio diminui quando se regista um valor de vácuo geral superior, em módulo.

Com base em estudos efetuados no complexo industria de Dombasle (13) concluiu-se que, a partir de um valor limite, quanto maior a espessura do bolo mais elevado é o teor de cloretos e mais húmido é o bicarbonato de sódio. Apesar do estudo em Dombasle diferir do realizado na Póvoa, uma vez que o primeiro recorre a uma variação de espessura para avaliar a resistência, ou perda de carga, conferida pelo bolo e na Póvoa opta-se por compreender a variação do vácuo geral para obter a mesma informação, pensa-se que estes estudos podem ser comparados. Como tal, constata-se que os resultados do estudo de Dombasle, no que diz respeito ao teor de cloretos, parecem contrariar os resultados obtidos na Póvoa.

Ao longo dos ensaios foi sendo notória a sensibilidade necessária aquando da determinação do teor de cloretos no bicarbonato de sódio pelo método analítico manual. O facto do método de análise recorrer a duas titulações por alteração de cor introduz algum erro por parte do operador, uma vez que a perceção da cor pode variar, podendo, no caso da segunda titulação, existir dúvidas no que diz respeito à tonalidade da cor final, o que pode resultar na adição de um pouco mais ou um pouco menos de titulante. Por outro lado, o facto de alguns mililitros de titulante poderem alterar o valor do teor de cloretos no bicarbonato de sódio, faz com que, o impacto provocado pela dificuldade na avaliação da

tonalidade da cor possa resultar num valor de teor de cloretos que não é o real. Como tal, pensa-se que esta aparente inversão do impacto do vácuo geral nos resultados do ensaio B.1 e B.2 em comparação com os estudos de Dombasle, se deve ao facto de, nos ensaios B.1 e B.2, se ter determinado o teor de cloretos do bicarbonato de sódio pelo método analítico manual.

Contudo existe uma alternativa para determinar o teor de cloretos do bicarbonato de sódio na sala de controlo de soda leve, um método analítico automático executado por um titulador que não foi utilizado na análise dos resultados dos ensaios B.1 e B.2, uma vez que são necessárias uma maior quantidade de bicarbonato de sódio, ao contrários das massa necessária para o método analítico manual para realizar a análise de cada amostra, o que resultaria numa perda de produto significativa e numa logística do ensaio mais complexa e para a qual não havia condições.

Desta forma, com base nos resultados obtidos nos dois ensaios deste estudo parece que a variação da qualidade da suspensão, avaliada pelo valor registado do vácuo geral, tem um impacto significativo na humidade do bicarbonato de sódio, tendo-se observado uma humidade do produto menor no ensaio onde se registou um valor de vácuo geral menor, em módulo. Por outro lado, contata-se que, apesar da aparente discordância com os resultados de Dombasle, parece que mesmo com a variação do valor do vácuo geral, o valor obtido para o teor de cloretos em ambos os ensaios mantém-se dentro do intervalo de qualidade utilizando um débito de água do lavador de 2 - 10 xx.

Apesar do resultado destes dois ensaios não permitir garantir uma diminuição da humidade no bicarbonato de sódio, uma vez que a média dos valores registados em 2011 é inferior ao valor da humidade no ensaio B.1, com o estudo levado a cabo nesta alínea adquire-se um melhor conhecimento da influência da variação do vácuo geral nesta variável de saída, o que permite compreender, pela primeira vez, qual o impacto na humidade do produto por se operar nas condições do complexo industrial da Póvoa, com reatores em *batch*, ao contrário do modo de funcionamento de todas as outras fábricas do grupo. Contudo, através deste estudo, pensa-se ser possível operar o filtro rotativo sob vácuo com um débito de água de lavagem inferior ao valor médio utilizado em 2011 na fabricação. Desta forma, uma diminuição de, aproximadamente, 0 - 5 xx pensa-se permitir diminuir o volume do líquido filtro enviado para o sector da destilação, resultando num ganho, por ano, de 200 - 6000 xx de vapor e 200 - 6000 xx de leite de cal, mantendo o teor de cloretos do bicarbonato de sódio dentro dos limites de qualidade exigidos. Por outro lado, uma vez que a água proveniente da destilação, utilizada nas rampas de lavagem, não é suficiente recorre-se, frequentemente, a água desmineralizada. Como tal, considerando que dos 0 - 5 xx de água de lavagem que se deixa de utilizar nas rampas, metade será água desmineralizada, forçando a diminuição do caudal de água de lavagem na rampa que utiliza água da destilação, pensa-se ser possível economizar 200 - 6000 xx de água desmineralizada por ano.

c. Impacto do vácuo de fixação, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio

Com o intuito de compreender o efeito do vácuo geral, do nível da cuba e do débito da água do lavador na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio, realizaram-se alguns ensaios onde, para o estudo de cada uma das três variáveis manipuladas, se estabeleceram condições de ensaio semelhantes, variando apenas o valor do vácuo geral.

Contudo, como tem sido demonstrado nos pontos que antecederam, a variação do vácuo geral tem um impacto muito significativo quer no teor de cloretos quer na humidade do bicarbonato de sódio, como tal, ao tentar compreender o impacto associado à variação destas três variáveis passamos a ter ensaios onde variam dois parâmetros, o vácuo geral e a variável manipulada em estudo. Como tal, a análise dos resultados não permite distinguir a contribuição do vácuo geral da contribuição da outra variável que foi regulada no valor obtido de humidade e teor de cloretos. Desta forma, nada pode ser dito, a cerca dos resultados obtidos para estes três estudos.

Em suma, estima-se que com a implementação das conclusões retiradas na globalidade do projeto permitam obter um ganho, sem qualquer investimento, de cerca de 10 - 100 xx euros por ano.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Foram feitos dois grandes estudos no decorrer desta dissertação de mestrado, o balanço aos secadores de soda leve e a melhoria de duas parcelas que constituem perdas energéticas significativas relativamente ao consumo total destes equipamentos.

Como tal, concluiu-se, pela análise do balanço energético aos secadores, que existem três parcelas que têm um contributo mais significativo no consumo total, são estas, as perdas ligadas ao desempenho dos secadores ($E_{desempenho}$), 5 - 20 %, as perdas ligadas ao sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio (E_e), 2 - 15 %, e as perdas associadas ao aquecimento da humidade contida no bicarbonato de sódio (E_d), 10 - 40 %. Contudo, para a melhoria energética serão apenas abrangidas as duas últimas perdas.

Por conseguinte, da melhoria da parcela que contabiliza o sobreaquecimento dos produtos da reação de calcinação e da humidade no bicarbonato de sódio para o secador 1, conclui-se que a aplicação do KAI de 100 - 300±4 °C permitiu diminuir 9 °C, relativamente à média deste secador, registada em 2011, o que resulta num ganho de 200 - 6000 xx de vapor por ano.

Por fim, no caso da melhoria da última parcela, por ter sido feito um estudo do funcionamento do filtro rotativo sob vácuo, conclui-se que a variação da qualidade da suspensão de bicarbonato de sódio, ou seja, da sua densidade e tamanho do grão do sólido, tem um impacto significativo no vácuo geral e na espessura. Pensa-se, também, que através da combinação do vácuo geral e da espessura do bolo é possível compreender, em linha, qual a qualidade da suspensão descarregada de cada reator e, como tal, a regulação da marcha do filtro rotativo sob vácuo deve ser feita com base nestes dois parâmetros e atuando na densidade da suspensão, uma combinação da válvula tanques e da válvula cuba.

Por outro lado, apesar dos ensaios realizados não permitirem garantir a diminuição da humidade do bicarbonato de sódio, relativamente à média dos valores de 2011, pensa-se que é possível operar o filtro com um débito de água de lavagem 0 - 5 xx inferior ao débito médio utilizado em 2011. Como tal, pensa-se que esta diminuição do caudal de água de lavagem irá permitir economizar, por ano, 200 - 6000 xx de vapor e 200 - 6000 xx de leite de cal nas destilações e, ainda, 200 - 6000 xx de água desmineralizada na rampa de lavagem que utiliza água da destilação.

Desta forma, estima-se que o projeto desenvolvido nesta dissertação de mestrado possa resultar num ganho total anual de cerca de 10 - 100 xx euros, sem ser necessário fazer qualquer investimento.

Contudo pensa-se que a melhoria energética destas duas parcelas pode ser aperfeiçoada com alguns investimentos, como tal, pensa-se que seria interessante criar condições para implementar um KAI no

secador 2 o que poderia trazer resultados iguais ou até mesmo melhores que os verificados no secador 1. Por outro lado, será muito importante, no futuro poder implementar um densímetro na saída dos tanques de suspensão de bicarbonato de sódio, que permita fazer a regulação automática da válvula automática que existe na saída dos tanques, a fim de manter uma densidade de suspensão constante. Após a aplicação deste equipamento e da regulação automática da densidade, será crucial planejar um estudo semelhante ao realizado nesta dissertação, de forma a compreender o impacto de algumas variáveis manipuladas, nomeadamente o vácuo de fixação e o nível da cuba, na humidade e no teor de cloretos do bicarbonato de sódio sem haver a interferência da variação da densidade da suspensão.

Por fim será ainda relevante efetuar um ensaio onde se diminui a velocidade de rotação do tambor que se pensa, com base em estudos conhecidos, ser a resposta à diminuição da marcha do filtro sem prejudicar a humidade e o teor de cloretos do bicarbonato de sódio.

6. Bibliografia

1. **World Energy Council.** *Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation.* London : World Energy Council, 2007.
2. **Presidency of the Brussels European Council.** 7224/1/07 REV 1. Brussels : Council of the European Union, 2007.
3. **Lapillonne, Bruno e Eichhammer, Wolfgang.** *Overall Energy Efficiency Trends and Policies in the EU 27.* Paris : ADEME Editions, 2009.
4. **Solvay S.A.** *Solvay working together towards sustainable chemistry.* 2012.
5. **Solvay S.A.** *Solvay Annual Report 2011.* 2011.
6. **Solvay S.A.** *Documento Projeto Solwatt.* 2012.
7. **European commission.** *Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Solids and Others industry.* Sevilha : European commission, 2006.
8. **Solvay Portugal.** *Memória descritiva: Produção industrial de carbonato de sódio (Processo SOLVAY).* 2011.
9. **Solvay Portugal.** *Memória descritiva do processo de produção de "salmoura depurada" e "salmoura depurada filtrada".* 2010.
10. **Solvay Portugal.** *Memória descritivo processo de fabrico do carbonato de sódio (leve e denso).* 2006.
11. *Comunicação pessoal de: Engenheiro Stephane Lepercq.* 2012.
12. **Solvay S.A.** *Formation Soudière: La filtration du BiBrut.* 2010.
13. **Solvay S.A.** *Secteur Filtration dans le procédé Solvay.* 2010.
14. **Solvay S.A.** *Estrutura do disco distribuidos - documento do gabinete de estudos: D.60300/66.*
15. *Comunicação pessoal de: Engenheiro José Conceição Ferreira.* 2012.
16. **Solvay Portugal.** *Caderno de encargos: Projeto de redução do teor de cloretos na soda leve e densa.* 1995.

17. **Mota, Paulo.** *Apontamentos da cadeira de Instrumentação e Controlo de Processos: Elementos de projecto de um sistema de controlo.* 2009.
18. *Comunicação pessoal de: Daniel Caldeira, condutor da sala de controlo da soda leve.* 2012.
19. **Solvay S.A.** *Sodiére - Fabrication.* 1996.
20. **Coulson, J. M. e Richardson, J. F.** *Chemical Engineering Volume 6.* s.l. : Pergamon Press.
21. **Fonseca, Isabel e Egas, Ana Paula.** *Fundamentos de Balanços de Energia.* Coimbra : Imprensa da Universidade de Coimbra, 2009.
22. **H. Perry, Robert.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* s.l. : McGraw-Hill Inc., 1985.